

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Optimalizace průtočné části zpětných klapek L10
Optimization of Flow Passage of the Check Valve L10

Student:	Bc. David Šoltys
Vedoucí diplomové práce:	prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.

Ostrava 2017

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. David Šoltys

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2302T043 Hydraulika a pneumatika

Téma:

Optimalizace průtočné části zpětných klapek L10
Optimization of Flow Passage of the Check Valve L10

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Zpracujte teoreticky a matematicky problematiku optimalizace průtočné části zpětných odběrných klapek typu L10 pro vysokotlakou páru z hlediska hodnoty ztrátového součinitele s využitím podkladů firmy ARMATURY Group a. s.

1. Popis funkce zpětné klapky pro řízení průtoku vysokotlaké páry.
2. Definování matematického modelu založeného na proudění jednofázové tekutiny (vody, páry), teorie optimalizace s využitím gradientové metody.
3. Definování fyzikálních vlastností páry a definice okrajových podmínek.
4. Vytvoření 3D modelu zpětné klapky a navazujících redukcí, specifikace ztrátového součinitele při proudění vody a páry, řešení silového působení hydrodynamické síly.
5. Optimalizace tvaru za účelem snížení ztrátového součinitele vlivem změny geometrie difuzoru případně dalších částí.
6. Zhodnocení variant řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.
- INCROPERA, F. a kol.: *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 6. edition, John Wiley and Sons 2007, 996p., ISBN 978-0-471-45728-2.
- KOZUBKOVÁ, M.: *Modelování proudění tekutin FLUENT, CFX*. Ostrava: VŠB-TUO, 2008, 115 s., ISBN 978-80-248-1913-6, (Elektronická publikace na CD ROM).
- KOZUBKOVÁ, M. a kol.: *Modelování přenosu hmoty, hybnosti a tepla*. Ostrava: VŠB-TUO, 2011, 115 s., ISBN 978-80-248-1913-6, (Elektronická publikace na CD ROM).
- Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 15 - Theory Guide*. 2013.
- Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 15 - User's Guide*. 2013.
- Ansys, Inc. *ANSYS FLUENT 15 - Adjoint Solver*. 2013.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc.**

Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

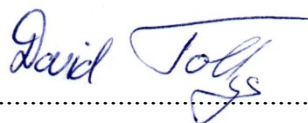
V Ostravě: 15. 5. 2017


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15. 5. 2017



podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. David Šoltys

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Ed. Beneše 26, 747 05 Opava 5

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

ŠOLTYS, D. *Optimalizace průtočné části zpětných klapek L10: Diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2017, 71 s. Vedoucí práce: Kozubková, M.

Diplomová práce je zaměřena na optimalizaci průtočné části zpětné klapky za pomoci výpočetního softwaru ANSYS Fluent a jeho optimalizačního nástroje Adjoint Solver. Cílem práce je optimalizovat průtočnou část armatury z hlediska snížení hodnoty ztrátového součinitele. Teoretická část práce je věnována problematice zpětných klapek, teorii definování matematických modelů při proudění jednofázové tekutiny a teorii Adjoint Solveru. V praktické části je popsán postup tvoření matematického modelu zpětné klapky a aplikace Adjoint Solveru. Následně jsou vyhodnoceny a porovnány ztrátové součinitele a hydrodynamické síly působící na talíř zpětné klapky.

ANOTATION OF MASTER THESIS

ŠOLTYS, D. *Optimization of Flow Passage of Check Valve L10: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydromechanics and Hydraulics Equipment, 2017, 71 p. Thesis head: Kozubková, M.

The master thesis is focused on optimization of flow passage of check valve with the help of computing software ANSYS Fluent and its optimization tool Adjoint Solver. The aim of the thesis is to optimize the flow part of the valve in terms of reduction of the loss coefficient value. The theoretical part of the thesis is devoted to the issue of check valve, the theory of defining mathematical models in the flow of single-phase fluid and the theory of Adjoint Solver. The practical part describes the process of creating a mathematical model of the check valve and application of Adjoint Solver. Subsequently, the loss coefficients and hydrodynamic forces acting on the non-return flaps are evaluated and compared.

Obsah

	strana
Seznam použitého značení	9
1 Úvod	11
2 Zpětné klapky	12
2.1 Konstrukce zpětných klapek	12
2.2 Použití zpětných klapek	14
2.3 Problematika optimalizace zpětných klapek	15
2.4 Ztrátový součinitel	16
3 Definice matematického modelu založeného na proudění jednofázové tekutiny	16
3.1 Metody matematického modelování turbulentního proudění	17
3.2 Metody řešení parciálních diferenciálních rovnic	18
4 Teorie optimalizace s využitím gradientové metody	19
4.1 Adjungovaný řešitel v softwaru ANSYS Fluent	19
4.1.1 Metodologie řešení Adjungovaného řešitele (Adjoint Solver)	21
4.1.2 Stabilizace	22
4.1.3 Obecné sledované proměnné (General observables)	23
4.1.4 Kritéria použití Adjoint solveru	23
4.1.5 Data pole (Field data)	24
5 Definování fyzikálních vlastností vody a páry	26
6 Matematický model zpětné klapky	28
6.1 3D model	28
6.2 Výpočetní síť	30
6.3 Definování matematického modelu v softwaru ANSYS Fluent	32
6.4 Vyhodnocení výpočtů	35
7 Aplikace adjungovaného řešitele	37
7.1 Definování adjungovaného výpočtu	37
7.2 Vyhodnocení adjungovaného výpočtu	39
7.3 Úprava geometrie a výpočetní sítě	39
7.3.1 Standardní výpočet	42
7.3.2 Adjungovaný výpočet	42
7.3.3 Vyhodnocení adjungovaného výpočtu	43
7.4 Modifikace tvaru	44
7.4.1 Freeform Scale Factor 1	48

7.4.2	Freeform Scale Factor 2	49
7.4.3	Freeform Scale Factor 3	51
7.4.4	Vyhodnocení tlakových spádů	52
8	Vyhodnocení ztrátového součinitele	54
9	Řešení působení hydrodynamické síly	55
9.1	Vyhodnocení hydrodynamické síly působící na talíř klapky	56
10	Standardní výpočet proudění páry	57
11	Závěr	59
12	Použitá literatura	62
13	Seznam příloh	64

Seznam použitého značení

Značka	Jednotka	Význam
\vec{a}		Předepsaný vektor
c_p	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Měrná tepelná kapacita
d	$[\text{m}]$	Průměr difuzoru na vstupu
F_a	$[\text{N}]$	Složka celkové síly
F_C	$[\text{N}]$	Výsledná síla
\vec{F}_p	$[\text{N}]$	Vektor tlakové síly
\vec{F}_v	$[\text{N}]$	Vektor viskózní síly
f	$[1]$	Počet modů energie (stupňů volnosti)
f_x	$[\text{N}]$	Složka vnější objemové síly
f_y	$[\text{N}]$	Složka vnější objemové síly
f_z	$[\text{N}]$	Složka vnější objemové síly
M	$[\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}]$	Molekulová hmotnost
m	$[\text{kg}]$	Hmotnost
\vec{n}		Normálový vektor
p	$[\text{Pa}]$	Tlak
p_{abs}	$[\text{Pa}]$	Absolutní tlak
$p_{DYNv\acute{y}stup}$	$[\text{Pa}]$	Dynamický tlak na výstupu
$p_{TOTvstup}$	$[\text{Pa}]$	Totální tlak na vstupu
$p_{TOTv\acute{y}stup}$	$[\text{Pa}]$	Totální tlak na výstupu
Q_v	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$	Objemový průtok
Q_m	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	Hmotnostní průtok
R	$[\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Univerzální plynová konstanta
r	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Měrná plynová konstanta

S	$[\text{m}^2]$	Plocha
S_ζ		Zdrojový člen
T	$[\text{K}]$	Absolutní teplota
t	$[\text{s}]$	Čas
t_p	$[\text{°C}]$	Teplota páry
u	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Složka rychlosti
V	$[\text{m}^3]$	Objem
v	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Složka rychlosti
v_v	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Vstupní rychlost
w	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$	Složka rychlosti
x		Souřadnice v kartézském systému
y		Souřadnice v kartézském systému
z		Souřadnice v kartézském systému
Δp	$[\text{Pa}]$	Tlakový spád
α_ζ	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Inverzní turbulentní Prandtlovo číslo
β	$[\text{°}]$	Úhel otevření
ζ	$[1]$	Ztrátový součinitel
ζ		Obecná proměnná
λ	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	Součinitel tepelné vodivosti
μ	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$	Dynamická viskozita
ν	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$	Kinematická viskozita
ρ	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota
σ	$[\text{Å}]$	Charakteristická délka
τ	$[\text{Pa}]$	Tenzor smykového napětí
Ω_μ	$[1]$	Experimentálně určená závislost na bezrozměrné teplotě
ε/k_B	$[1]$	Parametr energie

1 Úvod

Při návrhu a optimalizaci hydraulických komponentů a zařízení je obecně možné použít dvě metody.

Klasickou metodou je metoda experimentální. V hydraulických laboratořích se zkoumají různé modely součástí a zařízení za účelem poznání jejich základních vlastností, ověření navrhovaných domněnek, případně úprav odvozených teoretických rovnic na rovnice, které se blíže přibližují skutečnosti apod. V některých případech, jenž jsou jen velmi obtížně teoreticky řešitelné, nebo dokonce zatím neřešitelné, je možno získat potřebné hodnoty pouze pomocí experimentu. Ovšem ne všechny jevy jdou vypořádat prostřednictvím modelů.

Zde nachází uplatnění matematicko-fyzikální modelování, při kterém pomocí matematických modelů založených na aplikaci fyzikálních zákonů a jevů lze dospět k potřebným výsledkům. Tyto matematické modely spočívají v definici rovnic popisující dané děje, které je nutné řešit prostřednictvím numerických metod. K řešení se používají výpočetní softwary typu Fluent, CFX apod.

V rámci funkce těchto softwarů lze provádět simulace, což umožňuje v krátkém časovém intervalu vyhodnotit různé proměnné, optimalizovat konstrukci prvku tak, aby vyhovoval dané aplikaci apod. Předpokladem ovšem zůstává kontrola dosažených výsledků experimentální metodou.

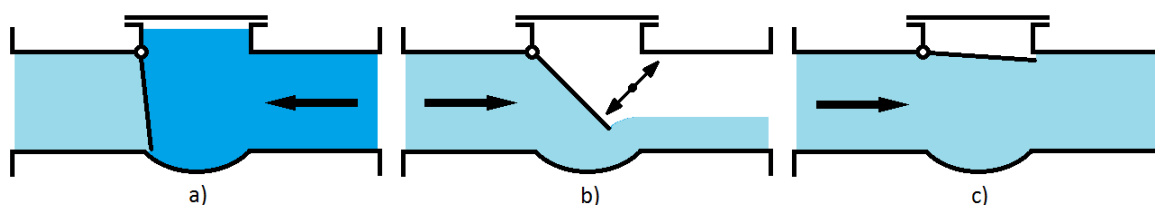
Optimalizace parametrů a tvarů výrobků a zařízení je již nedílnou součástí návrhového procesu. Dosáhnout zlepšení tvaru výrobku, aniž by se muselo vyrábět množství prototypů, lze vytvořením množství variant a provedením simulací pro různé podmínky. To znamená úsporu času a financí za současného dosažení kvalitativního zlepšení.

Tato diplomová práce si klade za cíl optimalizovat průtočnou část zpětné klapky typu L10 především z hlediska snížení hodnoty ztrátového součinitele za použití počítačového softwaru ANSYS Fluent, potažmo jeho specializovaného nástroje na optimalizaci tvaru Adjoint Solver.

2 Zpětné klapky

Zpětné klapky jsou armatury sloužící k řízení průtoku pracovního média v jednom směru a zamezení průtoku média ve směru druhém. V současné době se jedná o hojně využívaný prvek, který se uplatnil například v jaderných elektrárnách či plynovodech.

Fungování klapky je samočinné, neboť k otevírání/zavírání klapky dochází vlivem samotné váhy talíře a působením silových účinků proudící tekutiny na tento talíř. Ve chvíli, kdy jsou dynamické účinky média na talíř v rovnováze s gravitací talíře (případně také pákou), dochází k úplnému otevření. Jsou-li ale tyto silové účinky malé, dojde k přivření klapky nebo k jejímu úplnému zavření. V případě, že se v potrubí se zpětnou klapkou objeví proudění v opačném směru, které je větší, dochází k zavření klapky. Za normálního provozu jsou klapky plně otevřené s požadavkem na co nejmenší průtokový odpor. [3] [4]

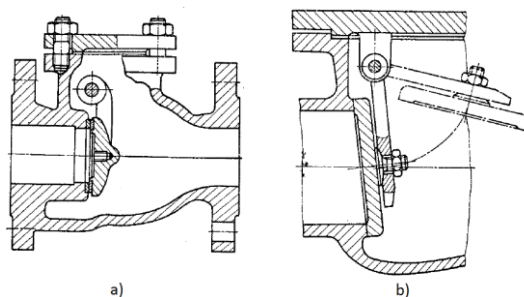


obr. 2.1 Schematické zobrazení klapky a) uzavřené, b) pootevřené, c) plně otevřené

2.1 Konstrukce zpětných klapek

Konstrukce zpětných klapek se skládá z tělesa, talíře, hřídele (případně čepů), víka a těsnění.

Uzavírací talíř, otočný kolem čepu nebo hřídele, je většinou opatřen kovovým sedlem, které může být uzpůsobeno tak, aby talíř dosedl na sedlo kolmo nebo šikmo ke směru proudění. Těsnost uzavření závisí na schopnosti rovnoměrného dosednutí talíře na sedlo, proto je v některých případech talíř osazen těsněním. [3]



obr. 2.2 Talíř dosedající na sedlo a) kolmo, b) šikmo [3]

Konstrukční nevýhodou klapky je, že při uzavírání dochází ke vzniku rázovitého uzavření. Jakmile se začne klapka uzavírat, dochází ke vzniku zpětného proudění, které působí na vnější stranu talíře. Nejvýraznější je zpětné proudění chvíli před plným dovřením klapky, což vede k prudkému uzavření. Na klapku lze namontovat tlumič, jenž zabrání tak prudkému dovření.

Metoda výroby a materiál tělesa se odvíjí od typu klapky. Nejčastěji se lze setkat s konstrukcí zhotovenou z výkovku, svařovanou nebo odlitou. Klapky se standardně zkoušejí vodou na pevnost, nepropustnost, těsnost uzávěru a funkčnost. [4]

Výrobci nabízejí ve svých katalozích více typů zpětných klapek, které se navzájem liší tvarem, velikostí, rozsahem jmenovitých světlostí, výrobním procesem a použitím v různých aplikacích.

Motýlková klapka

V tělese je talíř excentricky uložen na hřídeli, přičemž na vyčnívajícím konci je nasazena páka. Na páku lze nechat působit pružinu nebo přidat závaží, které zajišťují rychlé uzavření klapky při vzniku zpětného proudění. Těleso a talíř jsou vyrobeny ze šedé litiny nebo na odlitky z oceli. Je možné je zabudovat do vodorovného, svislého i šikmého potrubí. [3] [4]



obr. 2.3 Zpětná motýlková klapka s pákou [4]

Talířová klapka

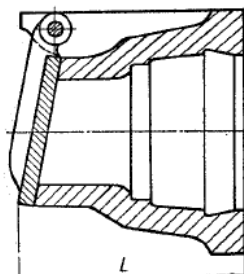
Funkce je stejná jako u předchozí klapky. Tento typ má ale výhodu ve své velmi jednoduché konstrukci, minimálních rozměrech a bezúdržbovém provozu. [4]



obr. 2.4 Zpětná talířová klapka [4]

Koncová klapka

Talíř dosedá na šikmé sedlo skloněné o 15° od svislé roviny. U některých konstrukcí může být použito závaží pro zajištění lepší těsnosti při uzavření a těleso a talíř bývají vyrobeny z šedé litiny. Používají se na výtoku z potrubí jako zabezpečení proti vniknutí kapaliny a nečistot z vnějšího prostředí. [3]



obr. 2.5 Zpětná koncová klapka [3]

Poruchové klapky

Využívají se jako ochranný prvek, kdy se při překročení maximálního přetlaku nebo rychlosti proudícího média v potrubí samočinně uzavírají. Jsou ovládány elektromagneticky [3]

Dále se vyskytují klapky vícenásobné (používají se pro potrubí velkých průměrů), zpětné klapky pro odstruskovací potrubí (doprava strusky z topenišť kotlů) a klapky pro naftové produkty. [3]

2.2 Použití zpětných klapek

Zpětné klapky se používají tam, kde je nežádoucí zpětné proudění. Tedy jako ochrana čerpadel, ventilátorů apod. Lze je montovat do potrubí vodorovných, svislých a v některých případech i šikmých. Směr proudění u svislých musí být vždy nahoru. Pracovním médiem může být voda (mořská, pitná), pára, ropa, vzduch, plyny atd. [4]

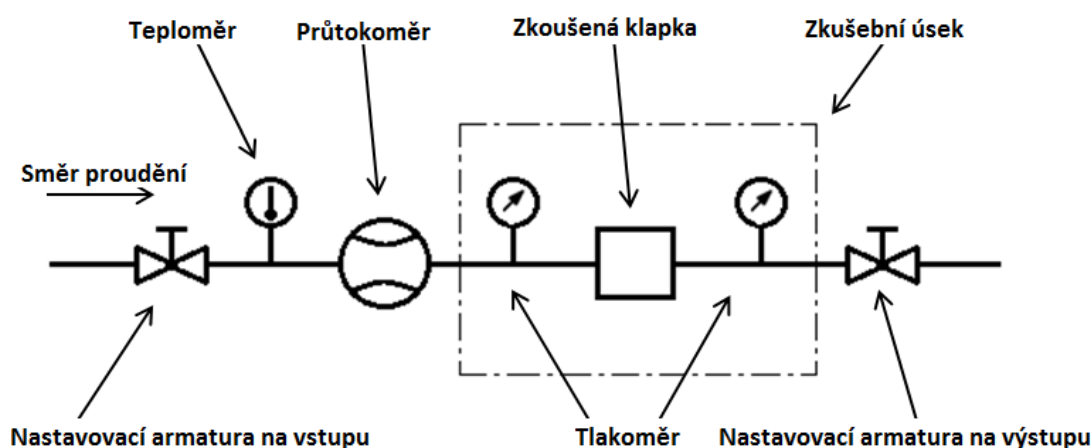
Využívají se především v chemickém průmyslu, energetice, vodárenství, plynárenství apod. Jsou důležitým prvkem v jaderných elektrárnách, ropovodech, plynovodech a parovodech.

2.3 Problematika optimalizace zpětných klapek

V současné době pokročilých počítačových technologií jsou k dispozici dvě metody řešení problematiky optimalizace zpětných klapek. Původní experimentální metoda a v posledních letech velmi rychle se vyvíjející metoda numerická. Výsledky poskytnuté při použití těchto metod nejsou naprosto přesné (např. nepřesné měření či špatně vytvořený matematický model). Proto se stalo zvykem vzájemné porovnání a kontrola dosažených výsledků.

Experimentální metoda

Vlastnosti zpětných klapek jsou ověřovány na měřicích tratích, kde je možné zjišťovat hodnoty např. tlakového spádu. Výhodou tedy je zjištění skutečných hodnot různých proměnných, případně ověření chování klapky v daných podmínkách apod. a využití těchto získaných dat k optimalizaci klapky. Problém ale tkví v nemožnosti podrobného zkoumání chování tekutiny na klapce. [1]



obr. 2.6 Schéma základního uspořádání měřicí tratě [11]

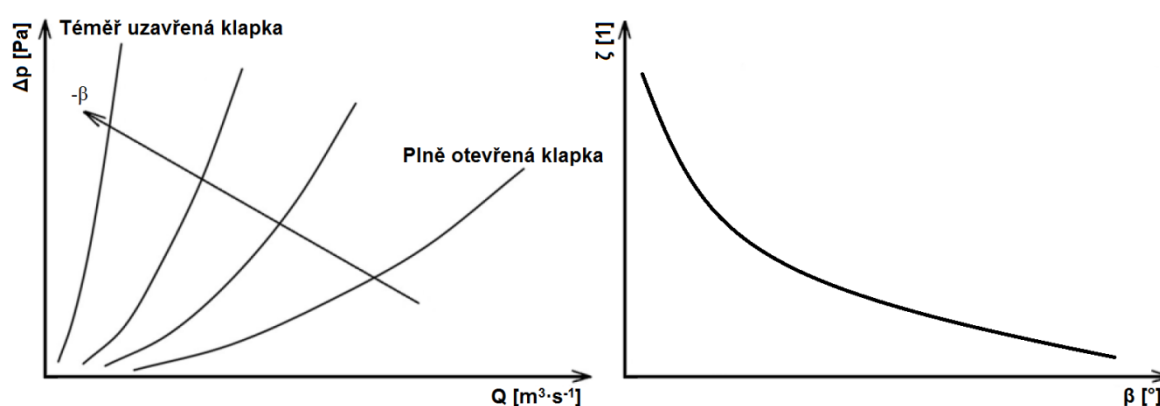
Numerická metoda

Numerická metoda spočívá ve využití počítačových softwarů (ANSYS Fuent, CFX), ve kterých se vytvoří dvojrozměrný nebo trojrozměrný model zpětné klapky spolu s matematickým modelem. Na tomto modelu se následně počítá a simuluje proudění daného pracovního média. Výhodné je, že tyto softwary umožňují kdykoliv přesně zkoumat proudění uvnitř klapky z mnoha hledisek. Ovšem vzhledem k náročnosti tvorby matematického modelu může dojít při výpočtu k chybě a software může simulovat

proudění pro nereálné podmínky. Nevýhodou také je časová náročnost, která stoupá s požadavkem na přesnější výsledky. [1] [2]

2.4 Ztrátový součinitel

Základní charakteristikou klapky je závislost tlakového spádu Δp , na průtoku Q . Tato charakteristika se skládá z dílčích charakteristik, které jsou naměřeny pro různé úhly pootevření talíře klapky β (obr. 2.7). Ztrátový součinitel ζ je přímo závislý na úhlu otevření talíře β (obr. 2.7), přičemž platí, že při plném otevření talíře je ztrátový součinitel nejmenší.



obr. 2.7 Δp - Q charakteristika zpětné klapky a zobrazení závislosti ztrátového součinitele na úhlu otevření talíře klapky [9]

3 Definice matematického modelu založeného na proudění jednofázové tekutiny

Matematický model spočívá v definici rovnic popisujících proudění tekutin, které je spjato s nutností řešit různé problémy, jež jsou dány fyzikálním modelem (laminární a turbulentní proudění, stlačitelné a nestlačitelné proudění, přenos tepla, chemické reakce atd.). Protože se jedná o děje rovinné dvourozměrné, osově symetrické, trojrozměrné a časově závislé, jsou charakterizovány soustavou parciálních diferenciálních rovnic, která se řeší pomocí numerických metod.

Proudění je popsáno základními fyzikálními zákony (zachování hmotnosti, tepla, hybnosti atd.), které jsou vyjádřeny Navier-Stokesovými rovnicemi a rovnicí kontinuity (rovnice 3.2), přičemž charakterizují jak laminární tak i turbulentní proudění. Pro nestacionární nestlačitelné neizotermní proudění je možné zapsat Navier-Stokesovy rovnice následovně [2]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z\end{aligned}\quad (3.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.2)$$

Systém parciálních diferenciálních rovnic je tvořen rovnicemi pro zachování hmotnosti, hybnosti, rovnicí energie a rovnicí pro transport chemických příměsí, přičemž všechny rovnice lze vyjádřit ve tvaru (rovnice 3.3), kde členy na pravé straně rovnice jsou konvektivní, difúzní a zdrojový člen a ζ je proměnná, která může vyjadřovat příměs, teplotu, složku rychlosti atd. Člen na levé straně rovnice vyjadřuje akumulaci. [2]

$$\frac{\partial(\rho\zeta)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \zeta) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\zeta \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} \right] + S_\zeta \quad (3.3)$$

3.1 Metody matematického modelování turbulentního proudění

Bylo vypořádováno, že při proudění kapalin mohou nastat dva režimy - laminární a turbulentní. Laminární proudění se vyznačuje uspořádaným pohybem částic a jeho rychlost je funkcí času a polohy, kdežto turbulentní proudění nastává, jestliže jeho proměnné vykazují chaotické fluktuace jak v prostoru, tak i v čase. Numerické modelování turbulence je stále ve stádiu výzkumu a vývoje, což má za následek neexistenci univerzálního modelu turbulence. V zásadě existují tři přístupy pro řešení numerických simulací turbulentního proudění, které vyplývají ze zjednodušených modifikací výchozích rovnic popisujících proudění.

Metoda přímé numerické simulace se vyznačuje velkými nároky na kapacitu počítače z důvodu velmi jemné výpočetní sítě. Tato metoda se projevuje prudkým nárůstem počtu uzlových bodů sítě s Reynoldsovým číslem, což vede k technické nerealizovatelnosti výpočtů při stávající výpočetní technice.

Metoda velkých vírů se zakládá na modelování velkých vírů, které jsou závislé v prostoru a čase a zároveň je lze zachytit sítí.

Nejpoužívanějším nástrojem jsou statistické modely turbulence, jež jsou založeny na metodě Reynoldsova časového středování veličin turbulentního proudění a bilančních rovnic. Aplikováním statistických metod výpočtu na turbulentní proudění, lze dojít k závěru, že i když se turbulentní proudění vyznačuje náhodným charakterem, je statisticky stabilní. Takové proudění lze řešit pomocí Navier - Stokesových rovnic. [2]

3.2 Metody řešení parciálních diferenciálních rovnic

Rozlišují se tři základní metody řešení parciálních diferenciálních rovnic.

Diferenční metoda je nejstarší všeobecně známou metodou. Spočívá v nahrazení derivací diferenčními podíly použitím Taylorova rozvoje, odvozením diferenčních rovnic a jejich řešením.

Metoda konečných objemů spočívá v dělení oblasti na diskrétní objemy užitím křivočaré sítě, bilancování neznámých veličin v individuálních konečných objemech a diskretizaci a na numerickém řešení diskretizovaných rovnic. Jde tedy o numerickou realizaci bilance příslušných veličin, nejčastěji hmotnosti, hybnosti, energie apod.

Metoda konečných prvků se zakládá na násobení diferenciální rovnice báзовými funkcemi a na dělení oblasti na trojúhelníkové nebo čtyřúhelníkové prvky v případě dvourozměrné oblasti a čtyřstěny resp. šestistěny ve trojrozměrné oblasti. Dále spočívá v integraci přes konečné elementy, která je založena na variačním principu.

Speciální metodou je spektrální metoda vhodná pro periodické proudění v jednoduchých oblastech. [2] [5]

Problematika této diplomové práce je řešena pomocí výpočetního softwaru ANSYS Fluent, který je založen právě na metodě Reynoldsova časového středování a metodě konečných objemů.

4 Teorie optimalizace s využitím gradientové metody

Optimalizace konstrukce součástí za využití softwarů je již nedílnou součástí návrhového procesu výroby. Ať už se jedná o optimalizaci za účelem snížení ceny výrobku, zvýšení jeho efektivity atd., téměř vždy je prvním krokem vytvoření matematického modelu a následná simulace, která provede analýzu a poskytne potřebná data. Díky tomuto přístupu je možné rychle tvořit množství variant řešení bez nutnosti vytváření modelů pro praktické zkoumání, což šetří čas i finance.

Existuje mnoho optimalizačních metod, jejichž vhodnost pro každý případ je definována časovou náročností úlohy a efektivností při manipulaci mnoha konstrukčních proměnných. Gradientová metoda je nejznámější metodou, která je schopna pracovat s velkým množstvím konstrukčních proměnných. Tato metoda je řešena prostřednictvím výpočetních schémat jako je schéma konečných diferencí a adjungovaná metoda. Na rozdíl od schématu konečných diferencí je adjungovaná metoda méně časově náročná při odvozování gradientu nákladové funkce, především kvůli nutnosti provést výpočet pouze jedenkrát, přičemž je nezávislá na konstrukčních proměnných.

Adjungovaná metoda umožňuje řešit úlohy dvěma přístupy - kontinuálním a diskrétním. Oba přístupy jsou odlišné, ale slouží pro výpočet stejné citlivosti dat. U kontinuálního přístupu jsou adjungované rovnice pro výpočet analyticky odvozeny z diferenciálních stavových rovnic, které jsou posléze diskretizovány. Při diskrétním přístupu jsou diferenciální stavové rovnice diskretizovány a až poté se počítají adjungované rovnice. V obou případech jsou výsledkem diskrétní adjungované rovnice. Problematika této diplomové práce je řešena za pomoci diskrétního přístupu, na jehož principu pracuje ANSYS Fluent, potažmo jeho optimalizační nástroj Adjoint Solver. [6] [7]

4.1 Adjungovaný řešitel v softwaru ANSYS Fluent

Základním kritériem pro jakoukoliv optimalizaci konstrukce prvku, jímž proudí tekutina, je analýza proudění, kterou lze získat užitím softwaru pracujícím na principu CFD (Computational Fluid Dynamics), v překladu "výpočet dynamiky proudění". Jedním z nejrozšířenějších a nejpoužívanějších analytických CFD softwarů je ANSYS CFD, který obsahuje dva nástroje, ANSYS CFX a ANSYS Fluent.

ANSYS Fluent je výkonný program, který umožňuje modelování komplexního proudění. V rámci své funkce obsahuje široký výběr fyzikálních modelů, umožňuje vytvoření a nastavení úloh spolu s jejich výpočtem a vyhodnocením. Je schopen simulovat laminární a turbulentní proudění, přestup tepla (konvekcí, vedením a sáláním), chemické reakce a mnoho dalšího. [2]

Součástí programu ANSYS Fluent je také modul Adjoint Solver (adjungovaný řešitel). Jedná se o specializovaný nástroj rozšiřující standardní analýzu, který je schopen poskytovat záznamy o citlivosti systému proudícího média, jenž lze využít k optimalizaci konstrukce daného prvku. Použití modulu je podmíněno již vytvořenou výpočtovou sítí, nastavením fyzikálních modelů, vlastností materiálů a okrajových podmínek a dokončením standardního výpočtu proudění. Není tedy reálně možné jej použít ve chvíli, kdy není k dispozici soubor dat popisující stav proudění, vygenerovaný standardním řešitelem.

Pokud se změní nějaký parametr definující daný problém, pak může dojít ke změně výsledku výpočtu. Míra změny výsledku závisí na citlivosti proudění vůči změněnému parametru. Derivace výsledku podle změněného parametru kvantifikuje citlivost prvního řádu. Stanovení těchto derivací je definicí citlivostní analýzy.

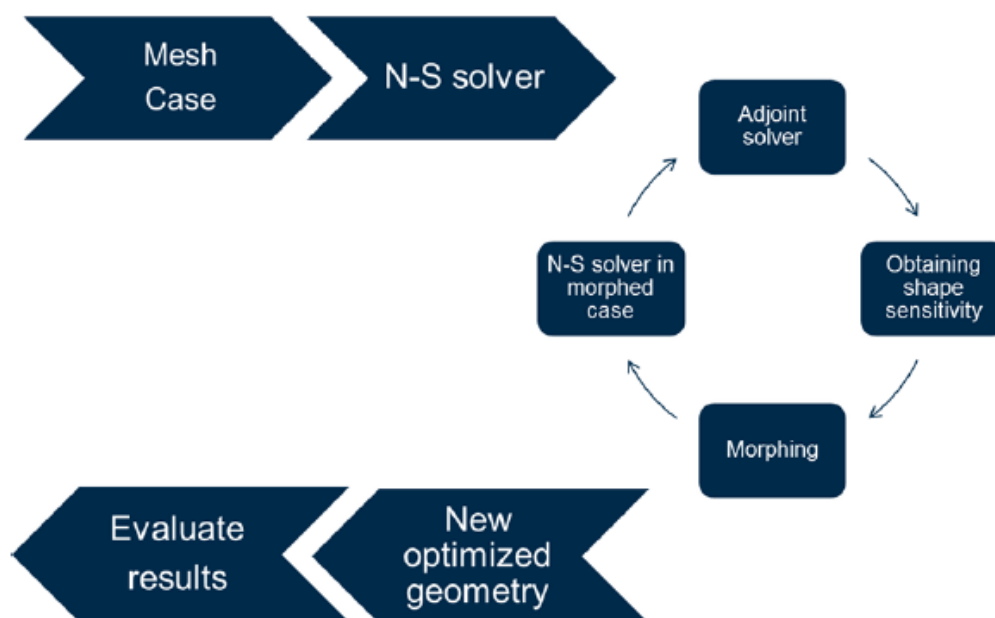
Citlivost tekutinového systému stanoveného prostřednictvím Adjoint Solveru uspokojí potřeby v optimalizaci tvaru na bázi gradientu. Tím je tento řešitel jedinečným a silným inženýrským nástrojem pro navrhování optimalizace tvaru.

Způsob výpočtu připomíná výpočet standardního proudění v mnoha ohledech. Je definována metoda řešení a monitorování residuálů, poté provedena inicializace řešitele, který následně prochází posloupností iterací ke konvergenci. Významným rozdílem je, že se volí pozorování skalární hodnoty před zahájením výpočtu.

Jakmile adjungované řešení zkonverguje, je k dispozici derivace sledované proměnné vzhledem k pozici každého bodu na povrchu geometrie a lze nalézt citlivost sledované proměnné pro konkrétní nastavení okrajové podmínky. Je tedy k dispozici velké množství derivovaných dat, které mohou být použity ke konstrukčním úpravám systému. Tyto úpravy mohou být velmi efektivní (neboť citlivostní soubor poskytuje mapu povrchu geometrie) pokud se aplikují na oblasti s vysokou citlivostí, protože malé změny budou mít velký vliv na "výkonnost" systému. [6]

4.1.1 Metodologie řešení Adjungovaného řešitele (Adjoint Solver)

Jak již bylo zmíněno výše, Adjoint Solver lze použít až ve chvíli, kdy je vytvořena výpočtová síť, jsou nastaveny fyzikální modely, okrajové podmínky atd. a je k dispozici soubor dat vygenerovaný standardním výpočtem proudění. Následující postup řešení je rozdělen na několik fází. První fází je samotné nastavení adjungovaného řešitele, kde spadá definování sledovaných proměnných, ovládacích prvků řešení atd. Následuje výpočet citlivosti systému vůči zadané sledované proměnné. Po skončení výpočtů (dojde-li ke konvergenci) je k dispozici citlivostní soubor dat, který lze využít k definování změny konstrukce systému tzv. "morphing". Adjoint solver umožňuje přesně a jednoduše určit, která část geometrie má být upravena. Po upravení tvaru není nutné vytvářet novou síť, protože k přetvoření výpočetní sítě dochází automaticky při změně geometrie. Dále je potřeba provést standardní výpočet za účelem analyzování proudění v nové geometrii. Konverguje-li výpočet, je možné opakovat celý postup, dokud dochází ke konvergování residuálů jak výpočtu citlivosti systému, tak standardního výpočtu nebo do doby, kdy je změna konstrukce a hodnota sledované proměnné shledána dostačující. Na obr. 4.1 je zobrazena metodologie řešení při použití modulu Adjoint Solver. [6] [7]



obr. 4.1 Metodologie řešení Adjoint Solver [7]

4.1.2 Stabilizace

Problémy se stabilitou mohou nastat při aplikování adjungovaného řešení na úlohy s velmi jemnou výpočtovou sítí, složitou geometrií, eventuálně na úlohy s vysokým Reynoldsovým číslem. Tyto nestability mohou vycházet z nepravidelností malých rozměrů v proudovém poli, případně silného smykového napětí a mají tendenci být omezeny na malé a izolované části oblasti průtoku. Jsou-li opomíjeny, může jejich přítomnost narušit celý adjungovaný výpočet navzdory tomu, že k výskytu může dojít pouze v několika buňkách výpočetní sítě. Aby bylo možné získat v takových případech adjungované řešení, je nutné aplikovat stabilizační schéma.

K překonání obtíží s nestabilitou při výpočtech jsou v programu ANSYS Fluent (Adjoint Solver) zakomponována tři stabilizační schémata. Jsou projektována tak, aby zasáhla do výpočtu pouze tehdy, je-li standardní schéma nestabilní (řešení nemá sklon ke konvergenci).

Prostorové schéma (Spatial scheme) identifikuje části oblasti, kde se vyskytuje nestabilní růst a aplikuje přímější a stabilnější postup řešení v těchto oblastech.

Modální schéma (Modal scheme) zahrnuje proces identifikace konkrétních detailů nestabilního růstu. Tyto růsty jsou lokalizovány v prostoru a slouží k rozdělení řešení do částí, které mají stabilní a nestabilní charakteristiky. Stabilní část postupuje obvyklým způsobem, zatímco algoritmus je navržen tak, aby kompenzoval pro nestabilní část, což má za následek stabilizaci celkového řešení.

Vznik nestabilních objektů může nastat kdykoliv v průběhu adjungovaného výpočtu a celkový počet nestabilních objektů závisí na daném případě. Existence 10 až 20 nestabilních objektů není nic neobvyklého. V případě velkých úloh jich je i mnohem více.

Disipační schéma (Dissipation scheme) poskytuje stabilizaci zavedením nelineární tlumící strategie do výpočetní domény. Tato strategie chce poskytnout minimální intervenci za účelem tlumení růstu nestabilit, které vedou adjungovaný výpočet k divergenci. Na základě adjungovaného výpočtu se sledují místa, kde dochází k nárůstu residuálů. Tlumení je přímo aplikováno do výpočtu v oblastech, kde dochází k růstu relativní chyby. Na rozdíl od prostorového a modálního schématu ovlivňuje disipační schéma adjungovaný výpočet jen minimálně. [6] [8]

4.1.3 Obecné sledované proměnné (General observables)

K dispozici je několik proměnných sloužících jako základ pro specifikaci kvantity, která je cílem výpočtu. Základní sledované proměnné jsou:

- síla: aerodynamická síla v určeném směru na jedné nebo více stěnách
- moment síly: aerodynamický moment o určitém centru a ose momentu
- swirl (vír): moment hmotnostního průtoku vzhledem k ose definované bodem a směrem
- tlakový spád mezi vstupem (případně skupinou vstupů) a výstupem (případně skupinou výstupů)
- pevná hodnota: jednoduchá pevná hodnota může být specifikována a použita v soustavě sledovaných proměnných
- povrchový integrál: různé povrchové integrály mohou být konstruovány pro určité pole proměnných v souboru ploch vybraných uživatelem

4.1.4 Kritéria použití Adjoint solveru

Adjungovaný řešitel je metoda, která má určité omezení a je realizována na následujícím základě:

- Stav proudění je definován pro trvale nestlačitelné jednofázové proudění, které je buď laminární, nebo turbulentní ležící v inerciální vztažné soustavě.
- Základní proudění je nutno řešit pro takové okrajové podmínky, aby úloha dobře a rychle konvergovala (tj. aby nebyla silně turbulentní, aby nevznikaly vírové cesty z důvodu obtékání překážek, aby byl v zájmové oblasti dostatečný tlakový spád), protože pak bude dobře konvergovat adjungovaný řešitel.
- Pro turbulentní proudění je použit předpoklad zmrazené turbulence, ve kterém se vliv změn stavu turbulence nebude brát v úvahu při výpočtu citlivosti.
- U turbulentního proudění jsou standardní stěnové funkce použity na všech stěnách.
- Adjungovaný řešitel využívá metod, které jsou ve výchozím nastavení prvního řádu přesnosti v prostoru.

- Okrajové podmínky jsou pouze následujícího typu: stěna, vstupní rychlost, výstupní tlak, symetrie, rotační a translační periodické podmínky

Je důležité si uvědomit, že tyto omezení se nevztahují na standardní výpočet proudění, ale pouze na Adjoint Solver. Když je Adjoint Solver inicializován nebo jsou vyhodnoceny sledované proměnné, pak ještě předtím, než se provede samotný výpočet, se provádí množství kontrol za účelem stanovení vhodnosti stávajícího nastavení řešení pro analýzu adjungovaným řešitelem. V případě, že je při kontrole nalezena nepodporovaná konfigurace řešení, je v některých případech možné výpočet provést, avšak kvalita dat adjungovaného řešení bude horší v důsledku nesouladu. Může nastat také případ, kdy je nastavení neslučitelné s výpočtem a je nutné provést změny v konfiguraci. [8]

4.1.5 Data pole (Field data)

Data adjungovaného řešení mohou být zpracována tak, aby poskytovala jak kvalitativní, tak i kvantitativní pohled na účinky mnoha typů změn, které lze vložit do systému. Zatímco změny tvaru jsou často ústředním předmětem zájmu, k dispozici je velmi bohatá sada dat velká jako původní pole proudění pro vyhodnocení. K dispozici jsou post-processingové nástroje, které umožňují adjungovaná data využít takovým způsobem, že poskytují užitečné podpůrné informace pro inženýra navrhujícího systém, nebo odpovídají na otázky týkající se spolehlivosti výpočtu původního proudění. Vzhledem k tomu, že ANSYS Fluent Adjoint Solver je diskrétní řešitel, údaje primitivního adjungovaného řešení poskytují citlivost na změny buněk výpočetní sítě. Normalizace těchto výsledků podle objemu buňky poskytuje pohled nezávislý na síti pro datový soubor.

Data adjungovaného řešení mohou být zpracována pomocí standardních nástrojů ANSYS Fluent včetně kontur, vektorů, XY grafů, histogramů a povrchových a objemových integrálů. Níže je vypsáno několik příkladů citlivostních datových polí.

Velikost citlivosti vůči objemovým silám (buňkové hodnoty) (Magnitude of Sensitivity to Body Forces (Cell Values))

Toto pole je tvořeno velikostí primitivního pole adjungované rychlosti. Pole může být vykládáno na úrovni buněk jako citlivost sledované proměnné na objemovou sílu v buňce, nebo všech faktorů, které mohou měnit rovnováhu hybnosti na buňku. Je to veličina závislá na buňce. Toto pole je často považováno za velké, například pro odpor tělesa ve směru proudu sledujeme citlivost na odpor snižující se ve směru proudu. To ukazuje interferenční vliv na objekt umístěný na různých místech proudu.

Citlivost vůči rychlosti na stěnách (Sensitivity to Boundary Velocity)

Pole citlivosti je definováno na hranicích, kde jsou rychlosti specifikované jako vstupní okrajové podmínky zahrnující no-slip a slip stěny. Vykreslené pole zobrazuje, kde změna rychlosti na hranici může mít vliv na sledovanou proměnnou. Přitom zavedení nenulové rychlostní podmínky na stěně bude mít vliv na sledovanou proměnnou, což může zahrnovat pohyb v rovině stěny samotné. Vykreslené pole například na vstupu rychlosti ukazuje, jak místní úpravy rychlosti vstupujícího proudu ovlivňují sledovanou proměnnou. Integrace potenciální změny rychlostního pole váženého polem citlivosti přes hranici poskytuje odhad vlivu změny prvního řádu na sledovanou proměnnou.

Citlivost vůči energetickým zdrojům (Sensitivity to Energy Sources)

Toto primitivní pole adjungované teploty normalizované objemem buňky je k dispozici, když se řeší adjungovaná energie. Pole lze interpretovat na úrovni buňky jako citlivost sledované proměnné s ohledem na energetické zdroje nebo úbytky v oblasti. Jsou nezávislé na velikosti buňky sítě.

Citlivost vůči viskozitě (Sensitivity to Viscosity)

Pole zobrazuje velikost citlivosti s ohledem na změny v turbulentní efektivní viskozitě pro turbulentní problém nebo v laminární viskozitě v laminárním případě. Citlivost je normalizována podle objemu buňky, aby byly zohledněny změny velikosti sítě.

Citlivost vůči velikosti tvaru (Shape Sensitivity Magnitude)

Toto pole je velikost citlivosti sledované proměnné s ohledem na deformaci působící na síť (jak hraniční tak vnitřní síť). Při vynesení citlivosti na povrchu tělesa (pokud je tato velikost velká) umístění označuje, kde malé změny tvaru povrchu mohou mít velký vliv na sledovanou proměnnou. V případě, že velikost citlivosti tvaru je malá, pak účinek na změnu tvaru v této oblasti má malý vliv na sledovanou proměnnou. Při prohlížení tohoto pole je často pozorováno, že velikost se liší v mnoha řádech velikosti. Kontury jasně upozorňují na regiony s nejvyšší citlivostí (často ostré hrany a rohy). Je však třeba mít na paměti, že i relativně malý pohyb plochy rozložený na velké ploše může mít kumulativní účinek, který je velký. [8]

5 Definování fyzikálních vlastností vody a páry

Tato práce se zabývá optimalizací konstrukce zpětné klapky za účelem snížení ztrátového součinitele za pomoci adjungovaného řešitele v softwaru ANSYS Fluent - Adjoint Solver. Proudícím médiem je vysokotlaká pára, která musí být při výpočtu definována jako stlačitelné médium. Ovšem jedním ze základních kritérií při použití Adjoin Solveru je, že proudění musí být definováno pro trvale nestlačitelné jednofázové proudění. Je tedy potřeba nahradit páru jiným médiem, které bude splňovat podmínky výpočtu. Nejjednodušším řešením je použití vody, která bude definována jako nestlačitelná a nezávislá na teplotě.

Fyzikální vlastnosti vody

Vlastnosti vody jsou určeny pouze hustotou a viskozitou a jejich hodnoty jsou definovány jako konstanty.

Hustota	998,2	kg·m ⁻³
Viskozita	0,001003	Pa·s

tab. 5.1 Fyzikální vlastnosti vody

Fyzikální vlastnosti páry

Fyzikální vlastnosti plynů jsou významně závislé na teplotě, která se může měnit, proto budou v následujících odstavcích definovány tyto závislosti.

Hustota plynů je dána stavovou rovnicí a je schopna zohlednit vliv teploty a tlaku, tedy:

$$p \cdot V = m \cdot \frac{R}{M} \cdot T \rightarrow \rho = \frac{M \cdot p}{R \cdot T} = \frac{p}{r \cdot T} \quad (5.1)$$

Zbylé fyzikální veličiny se definují v závislosti na teplotě experimentálně zjištěnými závislostmi. Podle kinetické teorie může být definována viskozita, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita a koeficienty difúze hmoty. [10]

Definice dynamické viskozity je následující:

$$\mu = 2,67 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\sqrt{M \cdot T}}{\sigma^2 \cdot \Omega_\mu} \quad (5.2)$$

kde

$$\Omega_{\mu} = \Omega_{\mu}(T^*) \quad a \quad T^* = \frac{T}{\frac{\varepsilon}{k_B}} \quad (5.3)$$

Funkce Ω_{μ} je experimentálně určenou závislostí na bezrozměrné teplotě.

Měrnou tepelnou kapacitu lze zapsat následovně:

$$c_p = \frac{R}{M} (f + 2) \quad (5.4)$$

kde f je počet módů energie (počet stupňů volnosti).

Tepelnou vodivost lze vyjádřit takto [10]:

$$\lambda = \frac{15}{4} \cdot \frac{R}{M} \cdot \mu \cdot \left(\frac{4}{15} \cdot \frac{c_p \cdot M}{R} + \frac{1}{3} \right) \quad (5.5)$$

V tab. 5.2 jsou vypsány hodnoty molekulové hmotnosti a Lennard-Jonesovy parametry, které byly získány z databáze Fluentu.

Molekulová hmotnost	Lennard - Jonesovy parametry	
	Parametr energie	Charakteristická délka
M [kg·kmol ⁻¹]	ε/k_B [K]	σ [Å]
18,01534	572,4	2,605

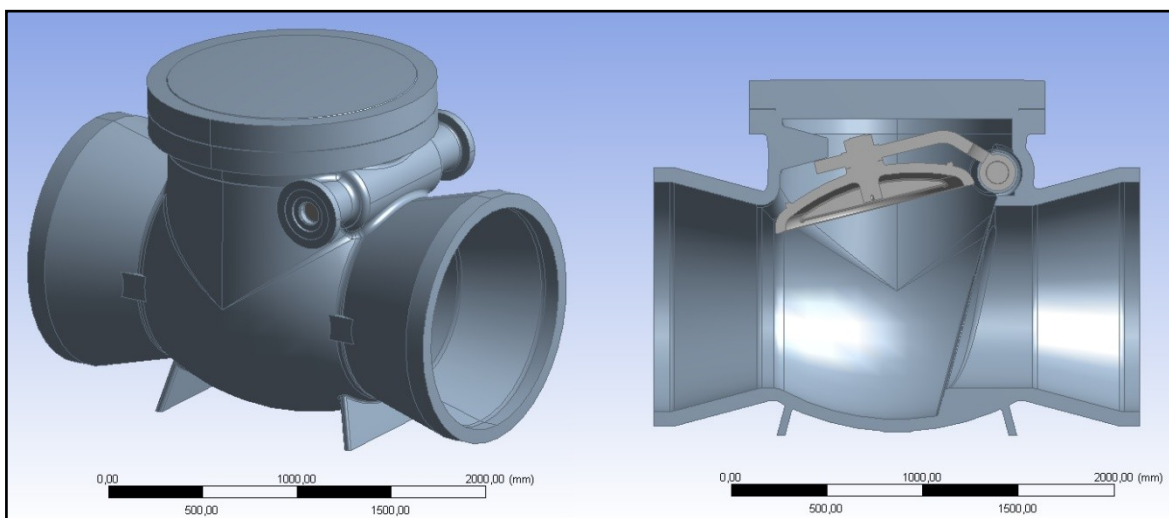
tab. 5.2 Fyzikální vlastnosti páry

6 Matematický model zpětné klapky

Jak již bylo řečeno, cílem diplomové práce je optimalizace konstrukce zpětné klapky za účelem snížení ztrátového součinitele za pomoci adjungovaného řešitele v softwaru ANSYS Fluent - Adjoint Solver. V následující části je popsáno vytvoření 3D modelu klapky a výpočetní sítě s následným definováním matematického modelu pro standardní výpočet proudění.

6.1 3D model

Geometrie 3D modelu zpětné klapky (obsahující těleso a talíř) ve formátu *.step (obr. 6.1) byla poskytnuta společností Armatury Group a.s. V tomto stavu však tento 3D model nelze použít pro výpočty, neboť se jedná pouze o geometrii samotné zpětné klapky, což neodpovídá kritériím použití programu ANSYS Fluent. Je tedy nutné přistoupit k úpravě geometrie a vytvořit vnitřní objemy, které budou později definovány jako simulované proudící médium.



obr. 6.1 Poskytnutá geometrie zpětné klapky

K práci s geometrií byl používán program ANSYS Design Modeler, do kterého byl importován 3D model zpětné klapky. Vytvoření vnitřních objemů bylo jednoduše provedeno pomocí příkazů "Extrude" a "Boolean". Nejdříve se zpětná klapka vyplnila dílčími objemy, které zasahovali do jejích stěn. Následně byl použit již zmíněný příkaz "Boolean", jenž umožňuje svou funkcí "Subtract" oříznutí dílčích objemů vůči klapce, tedy že ty části dílčích objemů, které zasahují do stěn klapky, jsou odebrány. Výsledkem je zpětná klapka plně vyplněná vnitřním objemem, který se ovšem stále skládá více dílčích

objemů. Sjednocení objemů do jednoho lze dosáhnout opět pomocí příkazu "Boolean", a to jeho druhou funkcí "Unite" (obr. 6.2).

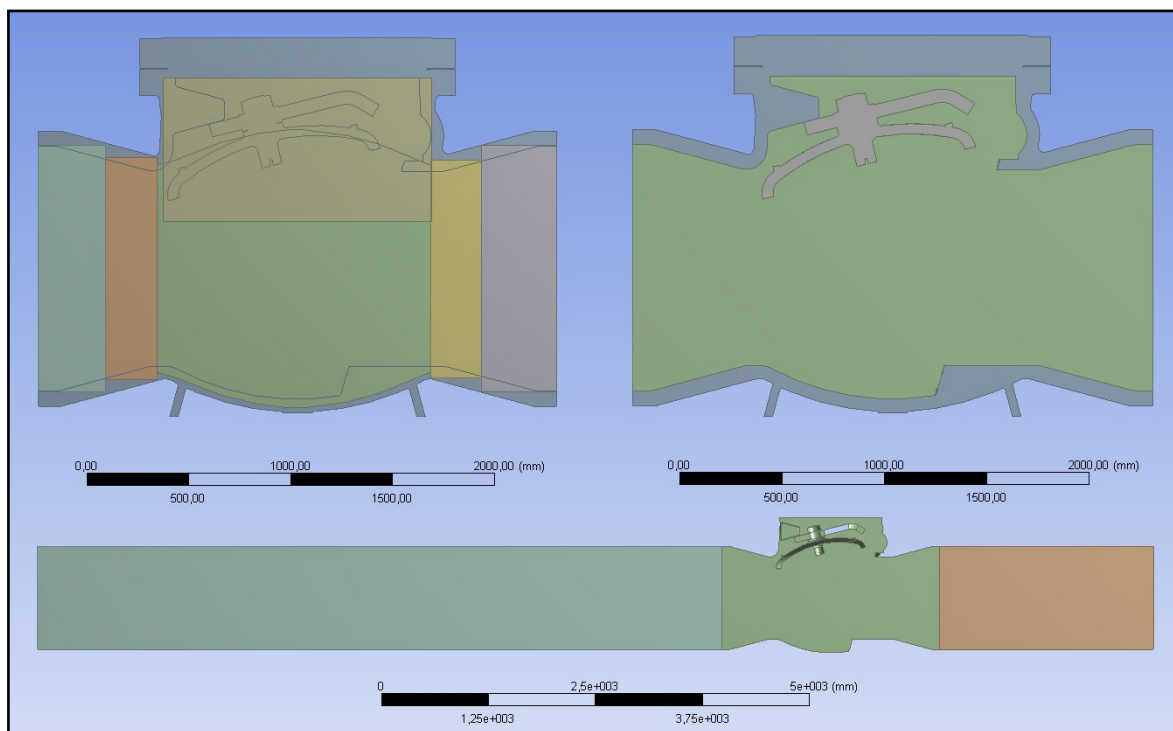
Dalším krokem bylo vymodelování navazujících potrubí, kdy potrubí na vstupu je dlouhé 2,5 metru a potrubí na výstupu 8 metrů. Potrubí jsou vymodelována z důvodu ustálení proudění jak na vstupu tak i výstupu ze zpětné klapky.

Protože se zkoumá pouze proudění bez přestupu tepla, byl odstraněn původní 3D model klapky (těleso i klapka) prostřednictvím příkazu "Suppress Body", který potlačí dané části geometrie, což znamená, že dojde k odstranění vybrané části. Kdykoliv je však možné část znovu zobrazit.

Ze zbylých tří částí se zhotoví jeden celek tzv. "part". Tato metoda spojí jednotlivé části dohromady, avšak zachová ony tři samostatné celky, které ale budou součástí onoho celku. Při vytváření výpočtové sítě je pak možné nastavit síť pro každou z těchto tří částí zvlášť.

Prostřednictvím příkazu "Symmetry" se celá geometrie rozpůlí a zobrazí v podélném řezu. Tento postup umožní vytvořit výpočetní síť s polovičním počtem buněk. To má za následek zrychlení výpočtů.

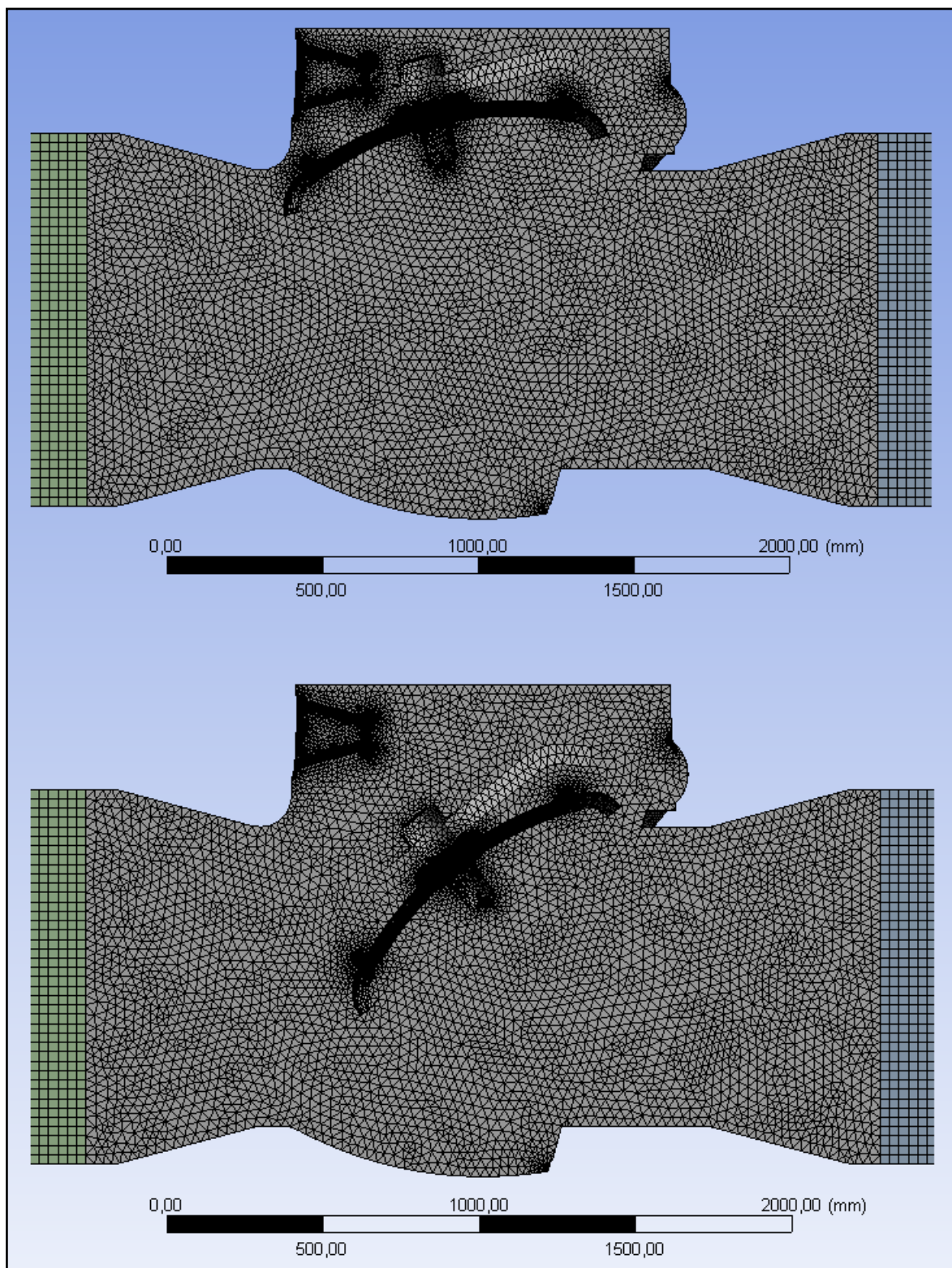
K výpočtu byly připraveny dvě varianty geometrie. S maximálně otevřenou klapkou a s klapkou sklopenou o 25°. Příprava obou geometrií je naprosto shodná s tím rozdílem, že u sklopené klapky byl použit příkaz "Rotate", který klapku pootočil o požadovaný úhel.



obr. 6.2 Znázornění tvorby vnitřního objemu a navazujících potrubí v podélném řezu pro maximálně otevřenou klapku

6.2 Výpočetní síť

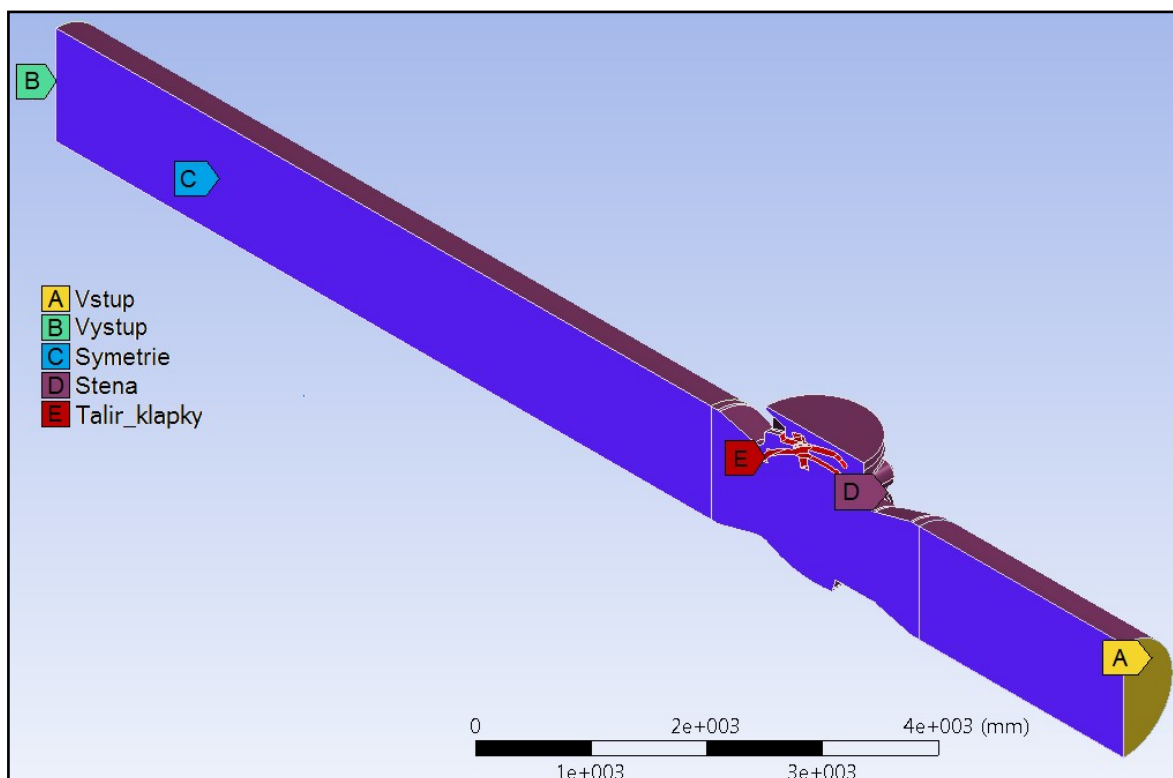
Výpočetní síť byla vytvořena v programu ANSYS Mesh. Metoda síťování byla ponechána automatická s následným manuálním upravováním hodnot minimálních a maximálních velikostí buněk. Výsledkem byla síť o počtu 1 303 502 buněk pro variantu s maximálním otevřením klapky a síť o počtu 1 327 316 buněk pro variantu se sklopenou klapkou (obr. 6.3). V rámci zjednodušení síťování byly některé části geometrie zpětně vyhlazeny. Jednalo se o části s různými výstupky či o části, které byly problematické z pohledu tvoření sítě. Upravovaná místa neměla vliv na proudění.



obr. 6.3 Výpočetní síť pro obě varianty geometrie

Kvalita těchto sítí je pro potřeby této práce dostačující, neboť není potřeba znát proudění uvnitř klapky naprosto přesně. Hlavním účelem standardního výpočtu je určit tlakový spád a ztrátový součinitel.

Po vygenerování výpočetní sítě se přistoupilo k určení a pojmenování okrajových podmínek (obr. 6.4). Pojmenování a určení se provedlo označením dané plochy a příkazem "Create Named Selection". Jednotlivé okrajové podmínky jsou vstup a výstup proudícího média, stěna (myšleno stěny pomyslných potrubí a tělesa klapky), stěna talíře klapky a plocha symetrie. Vlastnosti těchto okrajových podmínek se definují až při nastavení matematického modelu v ANSYS Fluent.



obr. 6.4 Okrajové podmínky (Named selections)

6.3 Definování matematického modelu v softwaru ANSYS Fluent

Tato podkapitola se zabývá popisem a nastavením matematického modelu v prostředí ANSYS Fluent. Prvním krokem bylo importování vytvořené geometrie včetně výpočetní sítě.

Vzhledem k vysokému Reynoldsovu číslu (rovnice 6.1) byl vybrán turbulentní dvourovnicový standardní $k - \epsilon$ model se standardní stěnovou funkcí. Tento model je vhodný pro proudění o vysoké turbulenci potažmo pro vysoká Reynoldsova čísla.

$$Re = \frac{v_v \cdot d}{\nu} = \frac{5 \cdot 1,2}{1 \cdot 10^{-6}} = 6\,000\,000 \text{ [1]} \quad (6.1)$$

Okrajové podmínky byly definovány následovně:

- vstup → velocity inlet (rychlostní podmínka)
- výstup → pressure outlet (tlaková podmínka)
- stěna → wall (stěna)
- talíř klapky → wall (stěna)
- symetrie → symmetry (podmínka symetrie)
- interior → interior (vnitřní objem)

Při definování vstupní podmínky bylo nutné určit vstupní rychlost proudění, intenzitu turbulence a hydraulický průměr. Poslední dva jmenované parametry se totožně nastavili i u tlakové podmínky na výstupu (tab. 6.1). Ostatní podmínky byly ponechány ve výchozím nastavení. Po konzultaci se zástupcem společnosti Armatury Group a.s. se výpočty za účelem zjištění ztrátového součinitele počítají pro vodu při vstupní rychlosti $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Výpočty byly realizovány pro proudění vody, jejíž fyzikální vlastnosti jsou definovány v kapitole 5. Výpočet ztrátového součinitele pro proudění páry je realizován v samostatné kapitole.

Okrajové podmínky	Rychlost proudění	Intenzita turbulence	Hydraulický průměr	Přetlak
	[$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]	[%]	[m]	[Pa]
vstup	5	1	1,2	-
výstup	-	1	1,2	0
stěna	-	-	-	-
talíř klapky	-	-	-	-
symetrie	-	-	-	-
interior	-	-	-	-

tab. 6.1 Tabulka nastavených parametrů okrajových podmínek

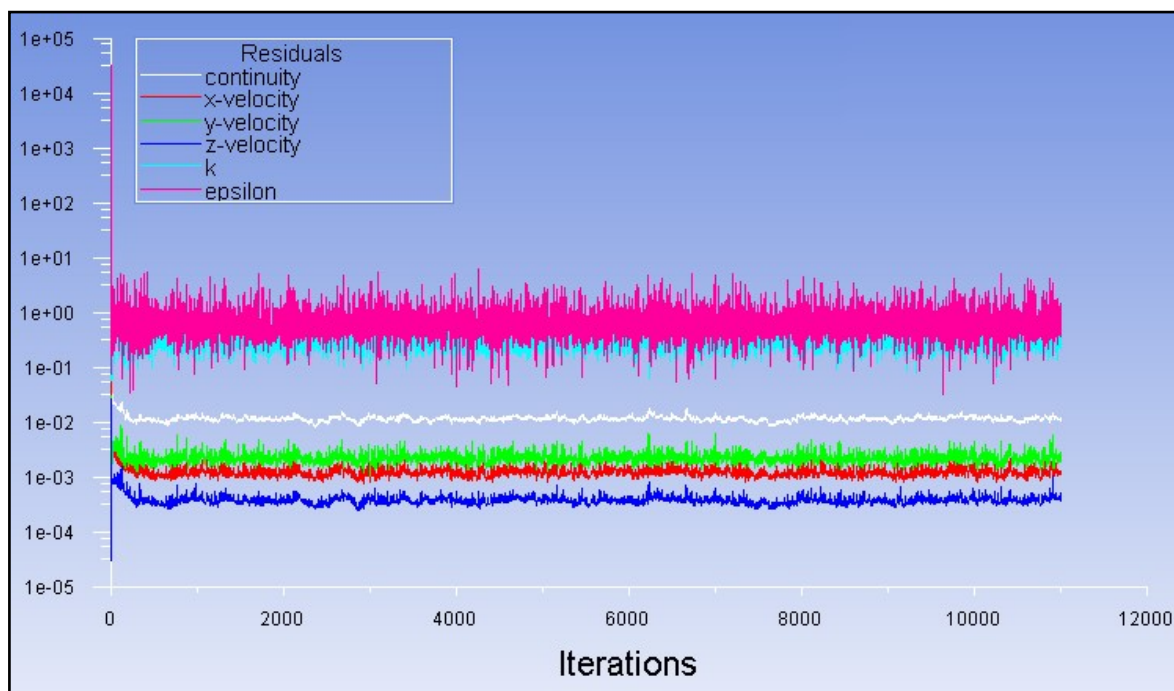
Nastavení metod řešení (Solution Methods) se projevilo poněkud problematické, protože i při plném otevření klapky dochází za klapkou ke zvíření a zpětnému proudění, což naznačuje potřebu počítat úlohu jako časově závislou. Vzhledem k tématu diplomové práce je zbytečné takto výpočet komplikovat. Pro výchozí nastavení výpočtu (tab. 6.2) byl proveden zkušební výpočet, který však neinklinoval ke konvergenci. Změnou nastavení výpočtu (tab. 6.3) (zjednodušením) se dosáhlo hladkého průběhu residuálů s tendencí konvergovat u obou variant geometrie. Počítalo se tedy s tímto upraveným nastavením. Níže jsou zobrazeny průběhy residuálů pro zmíněná nastavení (obr. 6.5 a obr. 6.6).

Výchozí nastavení metod řešení (Solution Methods)			
Scheme	Schéma	Simple	Jednoduché
Gradient	Gradient	Least Squares Cell Based	
Pressure	Tlak	Second Order	Druhého řádu
Momentum	Moment	Second Order Upwind	Druhého řádu
Turbulent kinetic energy	Turbulentní kin. energie	First Order Upwind	Prvního řádu
Turbulent dissipation rate	Míra rozptýlení turbulence	First Order Upwind	Prvního řádu

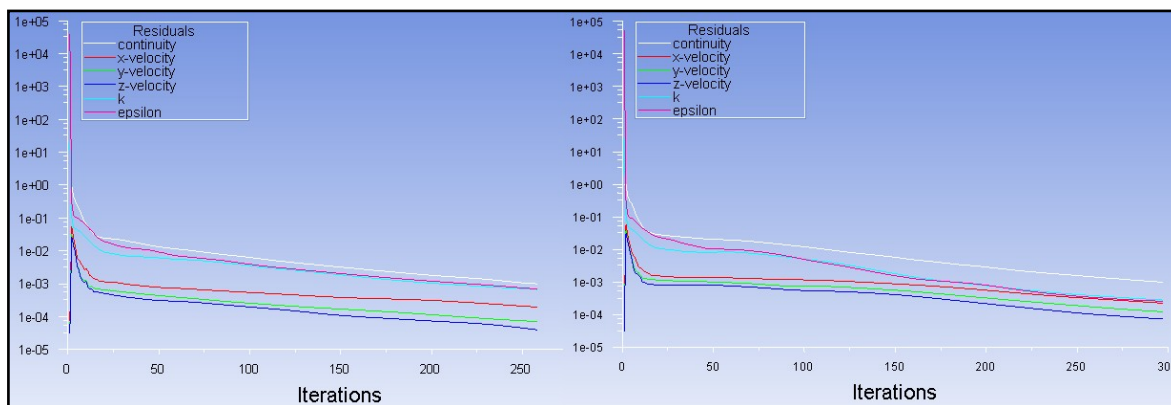
tab. 6.2 Výchozí nastavení metod řešení (Solution Methods)

Upravené nastavení metod řešení (Solution Methods)			
Scheme	Schéma	Simple	Jednoduché
Gradient	Gradient	Green-Gauss Cell Based	
Pressure	Tlak	Standard	Druhého řádu
Momentum	Moment	First Order Upwind	Prvního řádu
Turbulent kinetic energy	Turbulentní kin. energie	First Order Upwind	Prvního řádu
Turbulent dissipation rate	Míra rozptýlení turbulence	First Order Upwind	Prvního řádu

tab. 6.3 Upravené nastavení metod řešení (Solution Methods)



obr. 6.5 Průběh residuálů pro výchozí nastavení - varianta s maximálně otevřenou klapkou

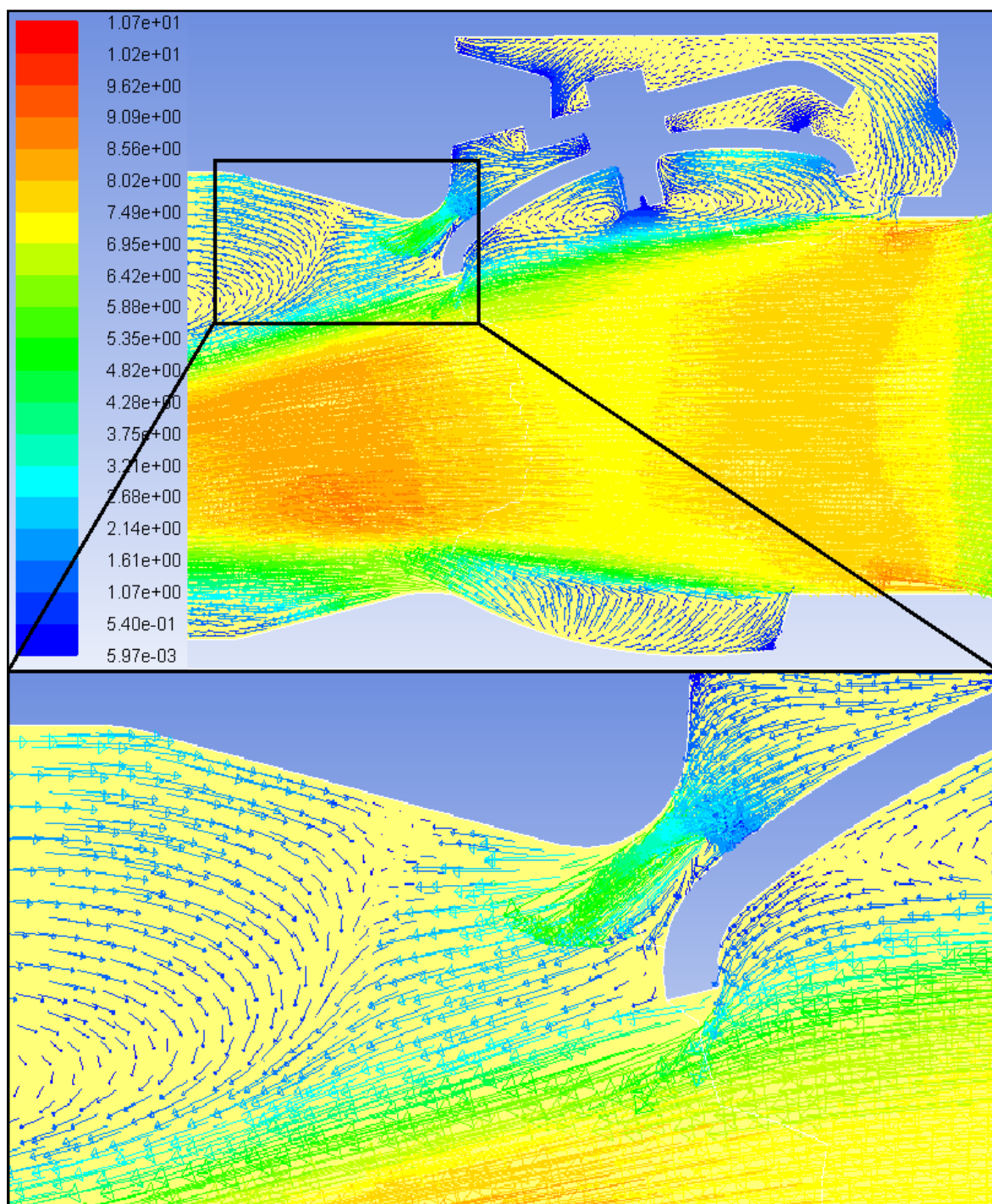


obr. 6.6 Průběh residuálů pro upravené nastavení - varianta s maximálně otevřenou klapkou a sklopenou klapkou

6.4 Vyhodnocení výpočtů

Vyhodnocené tlakové spády a ztrátové součinitele lze nalézt v tabulce tab. 7.1 a tab. 8.1, kde jsou přehledně zapsány a porovnány s hodnotami po úpravě geometrie adjungovaným řešitelem.

Ze zobrazených vektorů rychlosti na stěně symetrie (obr. 6.7) je viditelné, v jakých místech dochází ke zpětnému proudění při maximálním otevření klapky. Lze pozorovat, že těchto míst je několik. Klíčovým místem je však prostor za talířem klapky, kde je předpokládána největší citlivost tlakového spádu na geometrii viz kap 7.



obr. 6.7 Zpětné proudění v klapce (vektory rychlosti) - varianta s maximálně otevřenou klapkou

7 Aplikace adjungovaného řešitele

Po dokončení standardního výpočtu proudění lze přistoupit k aplikaci Adjoint Solveru. Modul se spouští zadáním přístupové cesty "define/models/addon-module/6" do příkazového řádku v prostředí ANSYS Fluent. Jakmile je tento proces u konce, zobrazí se nová nabídka "Adjoint", která po otevření nabízí následující možnosti:

- Observables (Sledované proměnné)
- Methods (Metody řešení)
- Controls (Rozšířené nastavení řešení)
- Monitors (Kontrola residuálů)
- Run Calculation (Spuštění výpočtu)
- Reporting (Hlášení)
- Design tool (Nástroj modifikace tvaru)

7.1 Definování adjungovaného výpočtu

Podnabídky observables, methods, controls a monitors slouží k definování adjungovaného výpočtu a jsou jednotlivě popsány v následujících odstavcích (grafické zobrazení viz Příloha A).

Observables (Sledované proměnné)

Tato podnabídka slouží k určení sledované proměnné (viz kapitola 4.1.3), která je určujícím parametrem celého výpočtu, neboť se celý zakládá na výpočtu citlivosti geometrie vůči této proměnné. Důležité je zvolit, zda se má proměnná maximalizovat nebo minimalizovat. Protože nelze definovat ztrátový součinitel jako sledovanou proměnnou, byl pro tuto úlohu definován tlakový spád (pressure drop), který se má minimalizovat mezi vstupem a výstupem, tedy mezi vstupní a výstupní podmínkou. Minimalizací tlakového spádu se dosáhne snížení ztrátového součinitele. [8]

Methods (Metody řešení)

Zde se nastavuje výpočetní schéma adjungovaného výpočtu. Adjungovaný řešitel využívá metod, které jsou ve výchozím nastavení prvního řádu přesnosti v prostoru. Je nutné brát na vědomí, že Adjoint Solver má velmi omezené možnosti nastavení ať už z pohledu použitého turbulentního modelu tak schématu výpočtu. Zde bylo použito stejné nastavení jako při výpočtu standardního proudění (tab. 6.3). [8]

Controls (Rozšířené nastavení řešení)

Nastavení užití stabilizačních schémat v případě, kdy řešení neinklinuje ke konvergenci, relaxačních faktorů atd. se provádí v podnabídce "Controls". Při výchozím nastavení se tyto rozšířené nastavení řešení automaticky přizpůsobují při výpočtu, aby podpořili konvergování řešení. Toto nastavení je vhodné pro úlohy nového typu, pro které nejsou příslušná nastavení známa. Z toho důvodu bylo výchozí nastavení použito i při řešení problematiky zpětné klapky. [8]

Monitors (Kontrola residuálů)

Průběh iterací a monitorování konvergence je ovládáno v podnabídce "Monitors". Lze rozhodovat, zda mají být jednotlivé kroky iterací vypisovány do příkazového řádku, jestli zobrazit průběh residuálů atd. Je také možné nastavit hodnoty, které slouží jako kritérium konvergence. Všechny položky byly ponechány ve výchozím nastavení. [8]

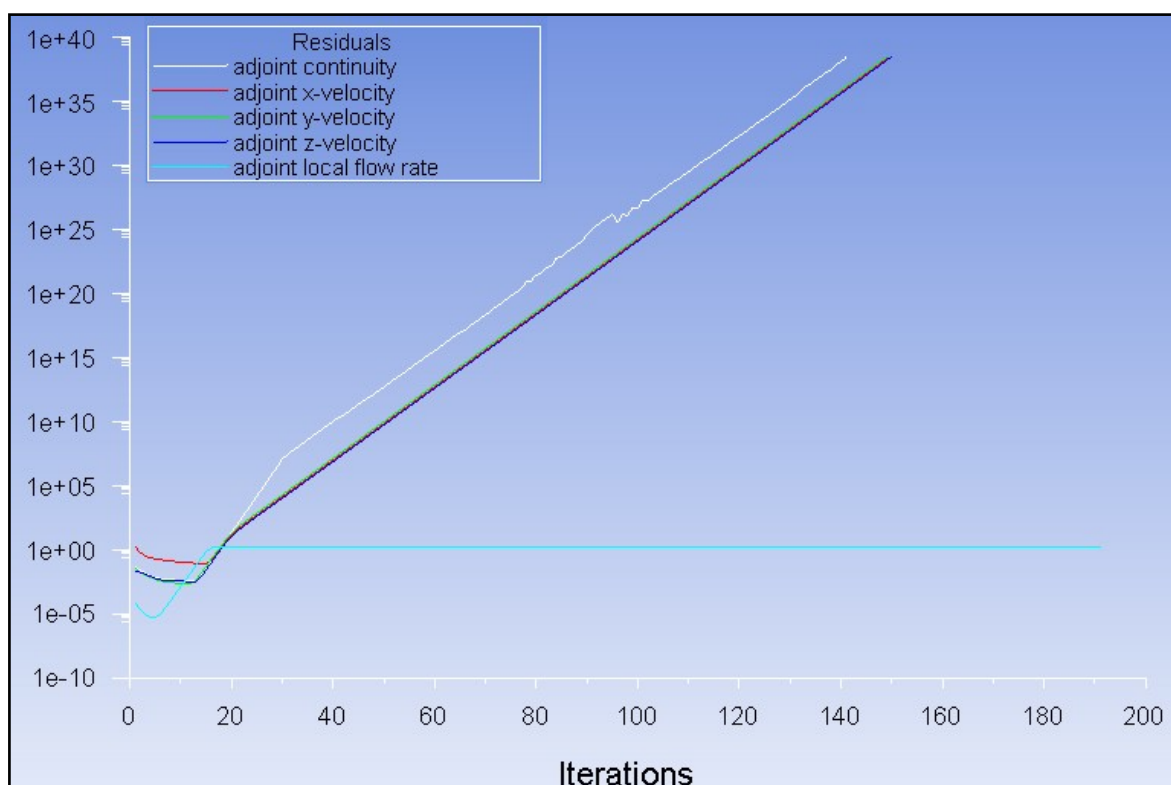
Run Calculation (Spuštění výpočtu)

Jakmile je vše nastaveno, v podnabídce "Observables" se spustí funkce "Evaluate", která vypíše současnou hodnotu sledované proměnné a zkontroluje, zda jsou jednotlivá nastavení v souladu s kritérii řešení. Pokud jsou nalezena nevhodná nastavení, dojde k jejich vypsání do příkazového řádku. V takové situaci je nutné pozměnit nastavení výpočtu, ovšem v některých případech je možné pokračovat ve výpočtu i s nepodporovaným nastavením, avšak kvalita dat adjungovaného řešení bude horší. Doporučuje se tedy přizpůsobit konfiguraci řešení tak, aby odpovídala daným kritériím řešení.

Po úspěšné kontrole byl v podnabídce "Run Calculation" inicializován a spuštěn adjungovaný výpočet.

7.2 Vyhodnocení adjungovaného výpočtu

Na obr. 7.1 je zobrazen průběh iterací adjungovaného výpočtu. Jak již bylo napsáno výše, v klapce dochází k výraznému zpětnému proudění, což má za následek nekonvergující výpočet. V rámci snahy o zlepšení průběhu výpočtu byla nejdříve použita stabilizační schémata, která ale neměla žádný vliv na průběh. Přistoupilo se tedy k novému vytvoření sítě s menším počtem buněk z důvodu snížení citlivosti adjungovaného řešení na zpětné proudění. Avšak ani tento postup nebyl úspěšný. Tudíž se přikročilo k úpravě geometrie, potažmo celého výpočetního procesu.



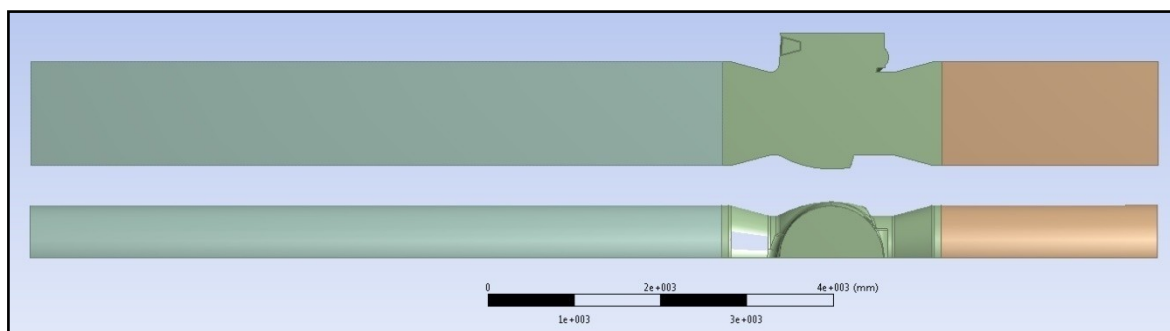
obr. 7.1 Průběh iterací adjungovaného výpočtu

7.3 Úprava geometrie a výpočetní sítě

K nejvýraznějšímu zpětnému proudění dochází za talířem klapky (obr. 6.7). Je to také místo, kde lze předpokládat největší citlivost vůči sledované proměnné (tlakový spád). Protože různá nastavení řešení nedokázala zajistit konvergující průběh řešení, přistoupilo se k odstranění talíře klapky, který má na zpětné proudění v kritickém místě největší vliv a současně není cílem optimalizace. Protože se upravila geometrie, bylo nutné zopakovat

celý proces vytvoření nové výpočetní sítě, nastavení a spuštění standardního výpočtu proudění a adjungovaného řešení.

Postup vytvoření nové geometrie byl obdobný jako při vytváření původní geometrie, tedy využívalo se převážně příkazů "Extrude" a "Boolean", s tím rozdílem, že se už před vytvářením vnitřních objemů odstranil talíř klapky. Výsledná geometrie je zobrazena na obr. 7.2.



obr. 7.2 Upravená geometrie bez talíře klapky

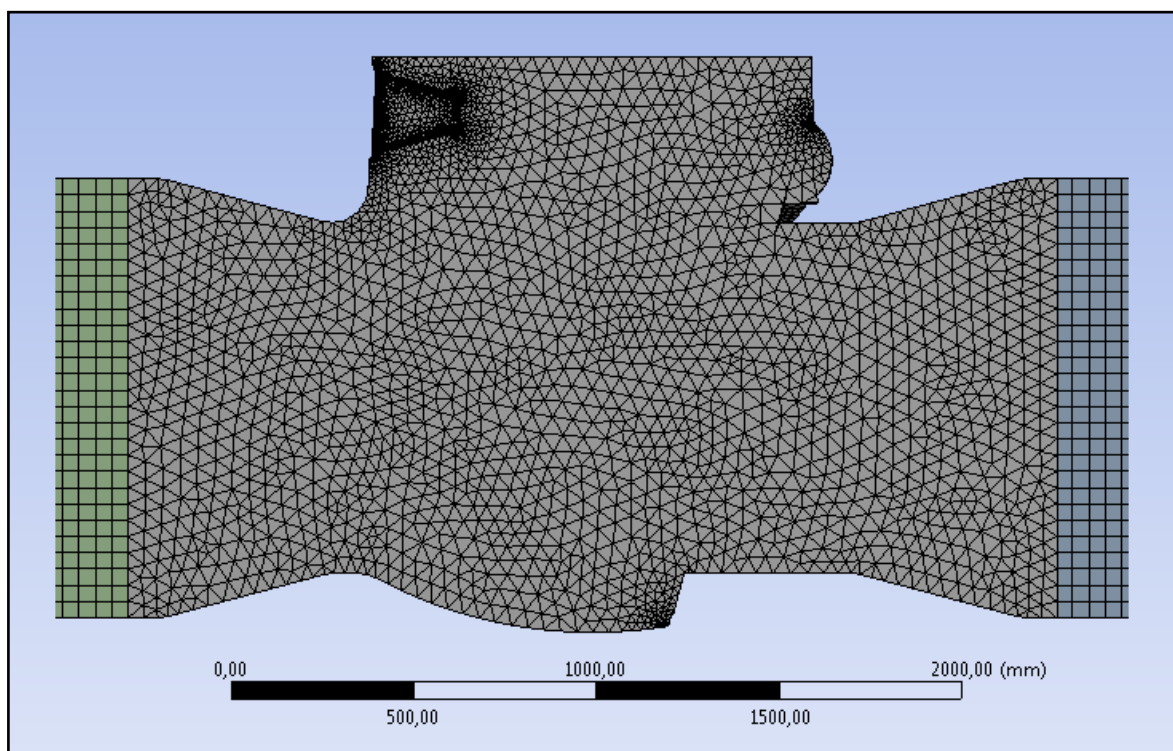
Vytvoření a určení jemnosti sítě

Stejně jako v předešlém případě byla síť vytvořena pomocí automatické metody s následným upravováním velikostí buněk. Vytvořeno bylo více variant sítí pro různé množství buněk, na kterých se zjišťovalo, kdy a zda bude mít adjungované řešení tendenci konvergovat.

Provedly se standardní výpočty proudění pro jednotlivé varianty, přičemž nastavení řešení bylo shodné s předcházejícím výpočtem (tab. 6.3). Jakmile řešení zkonvergovala, přistoupilo se k nastavení adjungovaného výpočtu, jenž je také shodné s nastavením předešlým.

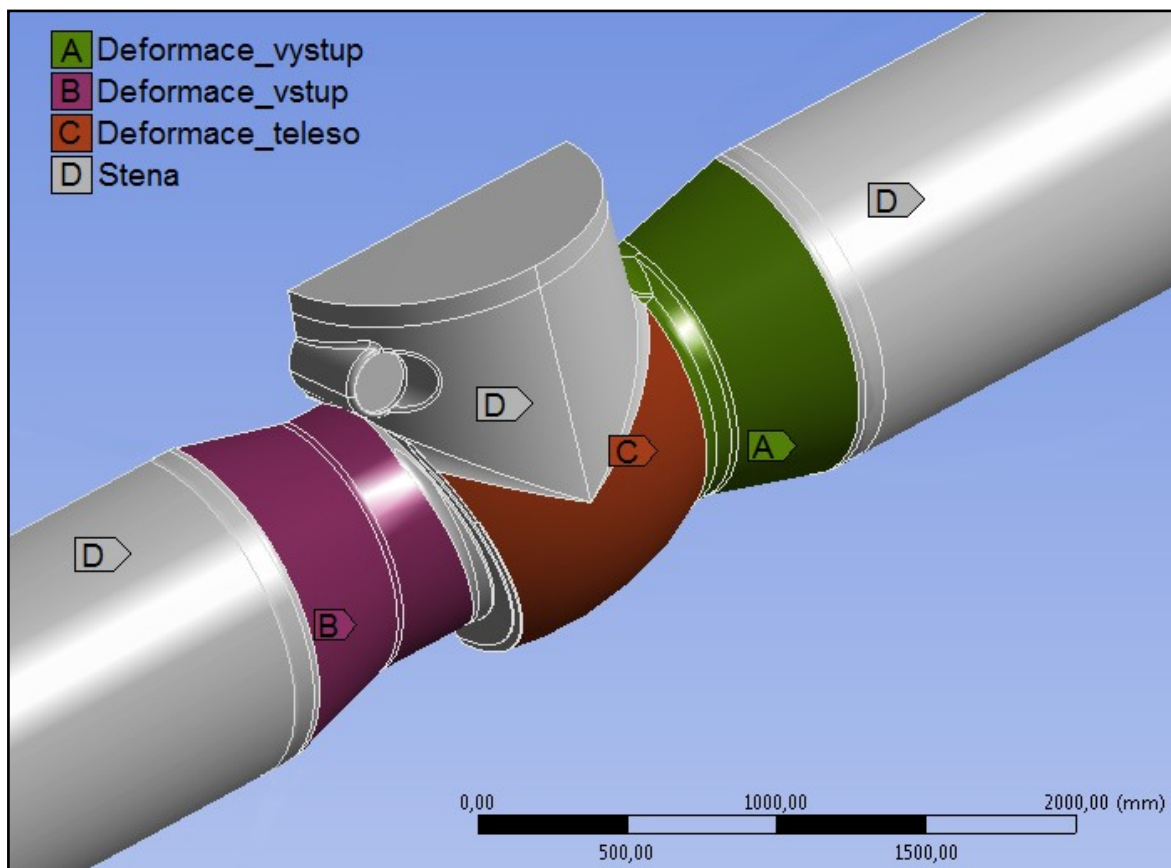
Po dokončení nastavení výpočtu a zkontrolování jeho správnosti (pomocí funkce "Evaluate") se provedla inicializace a spustil se výpočet adjungovaného řešení. Průběhy iterací pro varianty s počtem buněk nad cca 500 000 nevykazovaly zlepšení oproti původní variantě s talířem klapky. Varianta pro 496 496 buněk dosáhla konvergence řešení, avšak při následující zkušební úpravě geometrie a novém adjungovaném výpočtu již tendenci konvergovat neměla. Nakonec byla použita výpočetní síť s 348 495 buňkami (obr. 7.3), která konvergovala jak při adjungovaném řešení před zkušební úpravou tak i po ní.

Odstranění talíře klapky a vytvoření takto hrubé sítě je kompromis, na který je nutné přistoupit, neboť by jinak nebylo možné tuto úlohu řešit.



obr. 7.3 Výpočetní síť pro upravenou geometrii

Vytvoření nové geometrie a sítě bylo využito k úpravě umístění okrajových podmínek, kde se stěna klapky rozdělila na více částí (pomocí příkazu "Named Selection"). Byly přidány tři podmínky na stěnu, které umožní jednoduší optimalizaci tvaru. Podmínky vstupu, výstupu a symetrie zůstaly nepozměněny. Tento postup je zdůvodněn v následujících kapitolách.



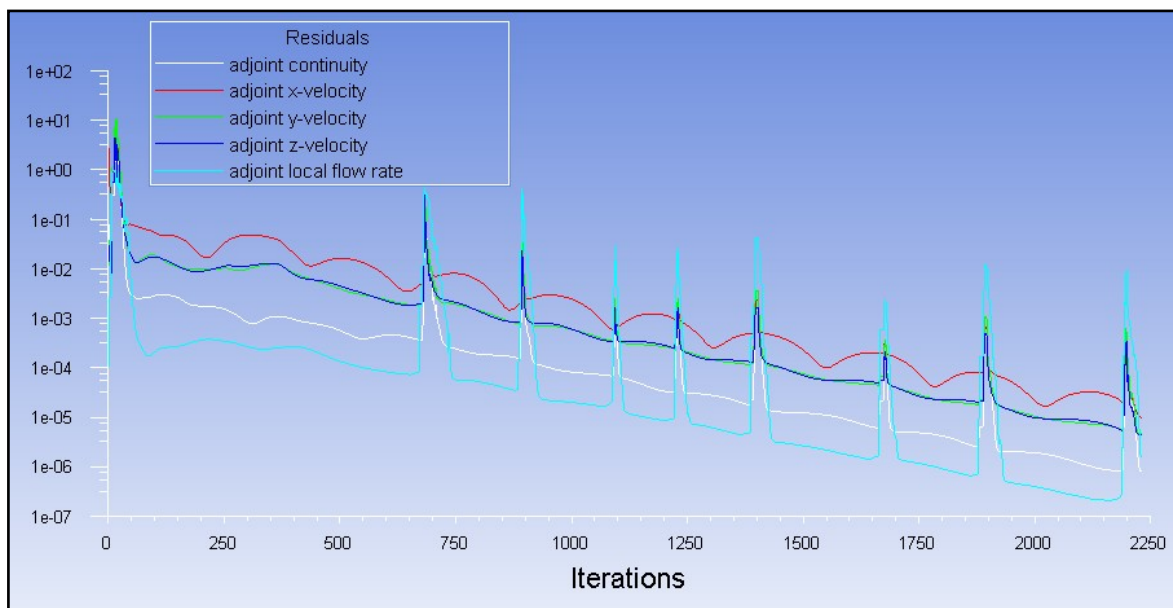
obr. 7.4 Přidané okrajové podmínky

7.3.1 Standardní výpočet

Jak již bylo zmíněno, standardní výpočet proudění proběhl pro stejná nastavení jako v případě geometrie s klapkou (tab. 6.3). Při definování okrajových podmínek bylo potřeba nadefinovat nově přidané podmínky jako podmínky typu "wall". Průběh residuálů je zaznamenán v příloze B.

7.3.2 Adjungovaný výpočet

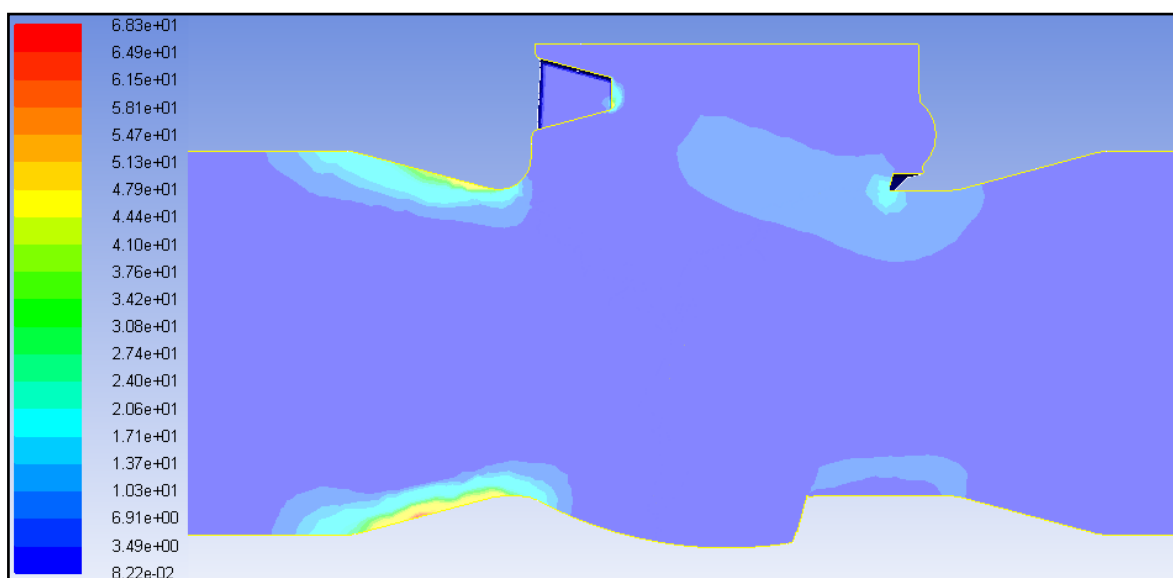
Ajungovaný výpočet byl také proveden pro stejná nastavení jako v předchozím případě. Během výpočtu řešitel vyhodnotil, že je potřeba užití disipačního stabilizačního schématu k zajištění konvergování řešení. Periodický průběh residuálů (obr. 7.5) vznikl vlivem zpětných proudění a víření v klapce.



obr. 7.5 Průběh residuálů při adjungovaném výpočtu

7.3.3 Vyhodnocení adjungovaného výpočtu

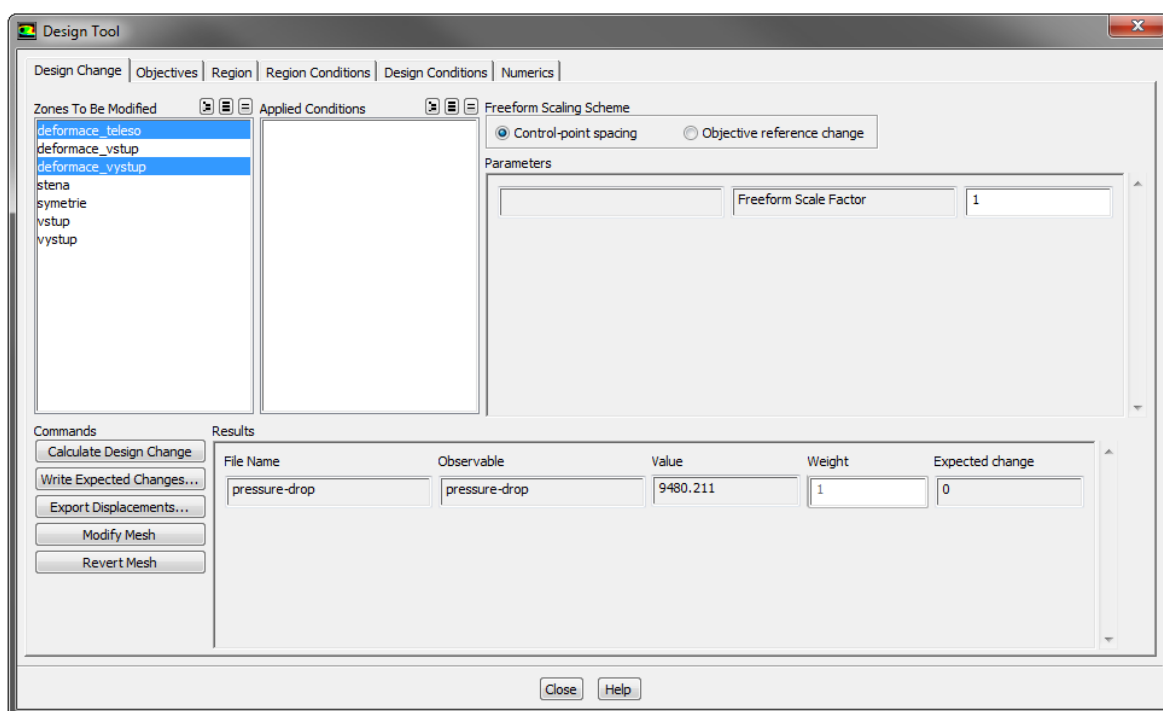
Vyhodnocení adjungovaného výpočtu lze provést grafickým zobrazením citlivostních datových polí. Na obr. 7.6 je zobrazeno datové pole velikosti citlivosti vůči objemovým silám (Magnitude of Sensitivity to Body Forces). Největší citlivost na sledovanou veličinu (tlakový spád) lze nalézt v zúžení výstupního difuzoru.



obr. 7.6 Zobrazení citlivostní mapy

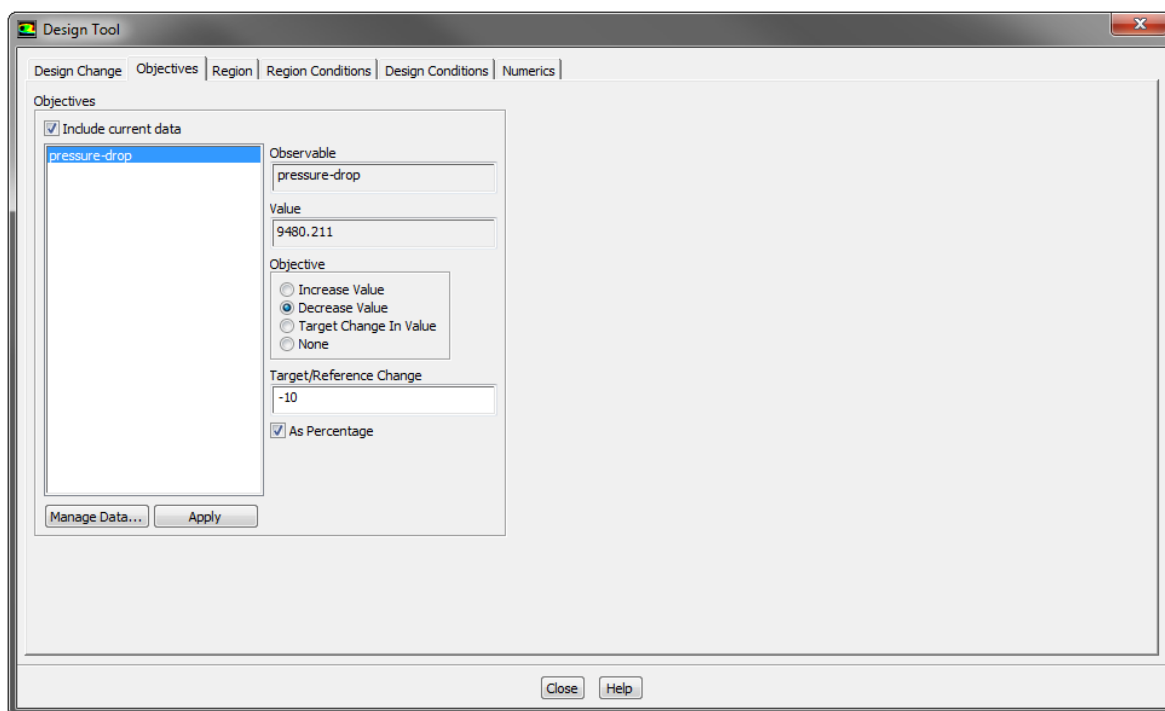
7.4 Modifikace tvaru

Modifikaci tvaru lze provést v podnabídce "Design Tool". Nejdříve je nutné určit, která stěnová okrajová podmínka bude deformována (záložka "Design Change"). Tady se uplatní upravené okrajové podmínky, jejichž výběrem je možné zaručit deformaci pouze těchto vybraných stěn. To je důležité, protože některé části konstrukce nelze měnit - např. sedlo talíře klapky. Vzhledem k tomu, že největší citlivost je na stěnách výstupního difuzoru, jsou vybrány jako "deformační stěny" okrajové podmínky "Deformace_vystup" a "Deformace_teleso" (obr. 7.4). Dále je nutné nastavit hodnotu "Freeform Scale Factor", která, zjednodušeně řešeno, vyjadřuje míru deformace.



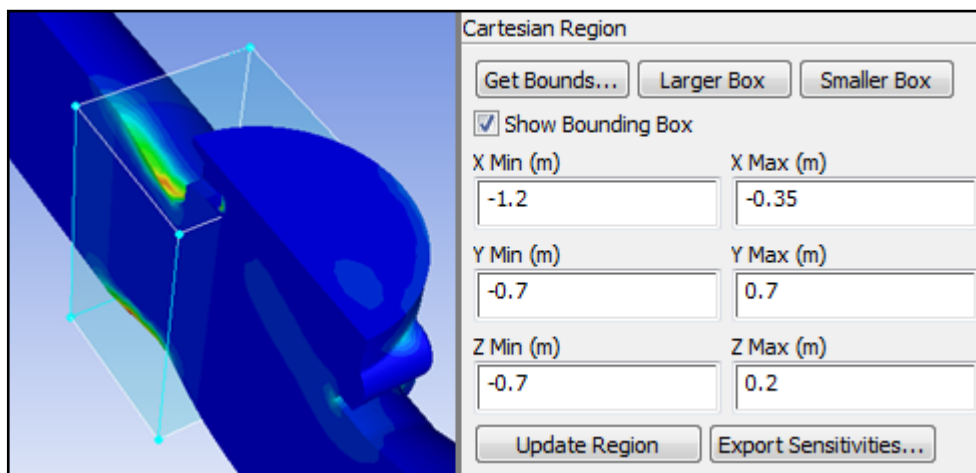
obr. 7.7 Zobrazení nabídky "Design Tool" a podnabídky "Design Change"

Klíčovým prvkem nastavení je určení cíle modifikace, tedy za jakým účelem je změna tvaru provedena. Toho se docílí v záložce "Objectives", kde je možné nastavit, zda má být hodnota sledované proměnné zvýšena nebo snížena. Určí se referenční hodnota změny, jejíž doporučená hodnota je cca 10%. V tomto případě je třeba nastavit, že je požadováno snížení hodnoty tlakového spádu.



obr. 7.8 Zobrazení nabídky "Design Tool" a podnabídky "Objectives"

Dalším krokem je určení hranic deformace (záložka "Region"), přičemž se jedná o upřesnění deformační oblasti. Oblast je nastavena tak, aby pokryla část klapky s největší citlivostí.

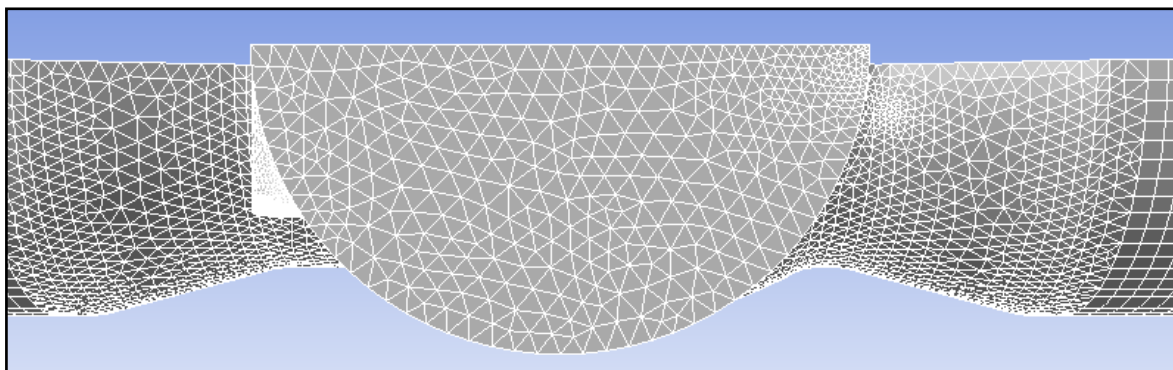


obr. 7.9 Nastavení oblasti deformace

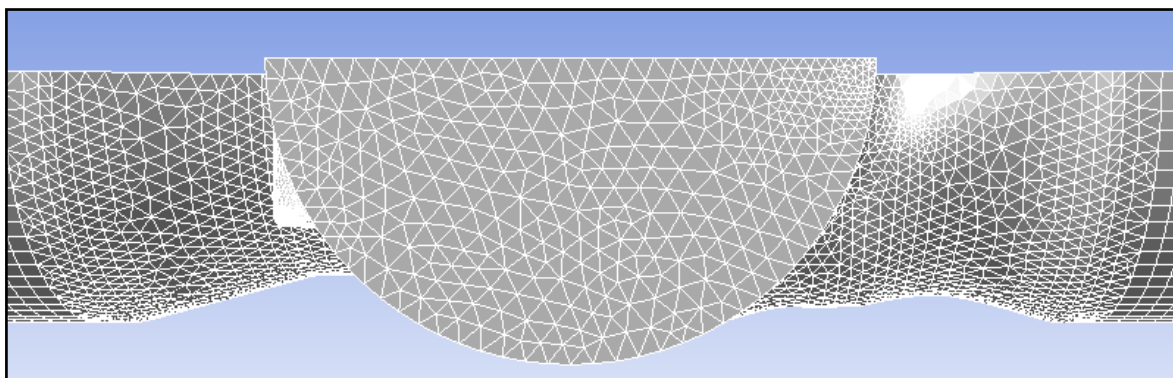
Zbývá nastavení, která např. poskytují možnost přesného určení deformace v dané ose, byla ponechána ve výchozím stavu. Po dokončení konfigurace se v záložce "Design Change" spustí funkce "Calculate Design Change", jež spočítá předpokládanou hodnotu, o kterou se sledovaná proměnná sníží (nebo zvýší). Následně se zvolí funkce "Modify Mesh", jež modifikuje tvar a výpočetní síť klapky.

Jakmile je modifikován tvar funkcí "Modify Mesh", je nutné přejít ke standardnímu výpočtu proudění, který přepočítá proudění ve zpětné klapce pro upravenou geometrii. Zkonverguje-li výpočet, lze vyhodnotit skutečnou změnu hodnoty sledované proměnné pomocí funkce "Evaluate" v podnabídce "Observables" nebo prostřednictvím nabídky "Reports/Result Reports".

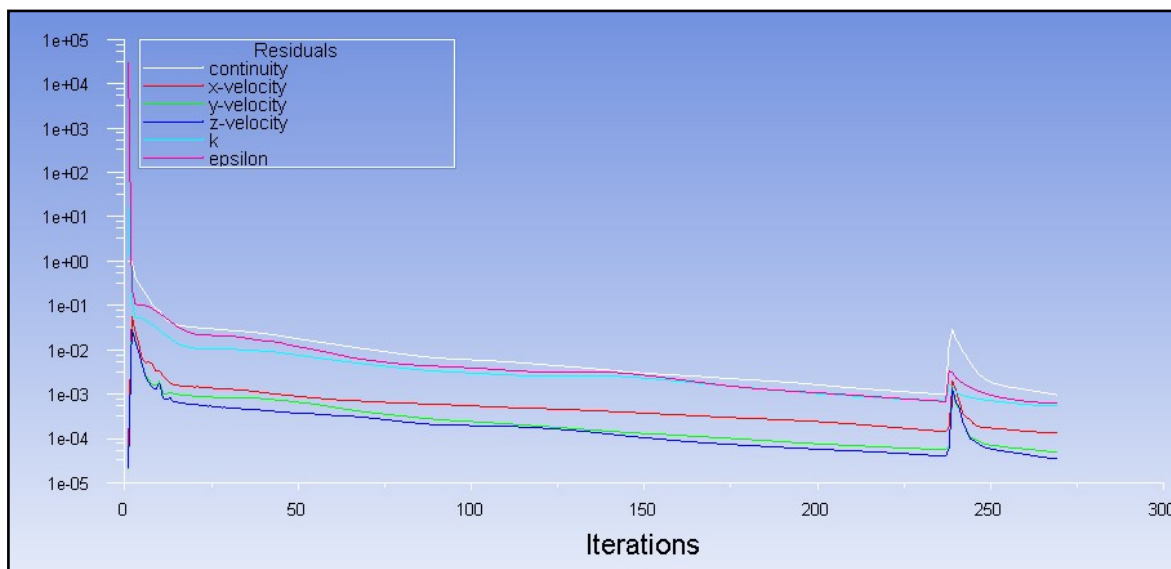
Na obrázcích níže je zobrazen původní a upravený tvar geometrie. Průběh residuálů standardního výpočtu pro novou geometrii je zobrazen na obr. 7.12.



obr. 7.10 Původní tvar a výpočetní síť



obr. 7.11 Upravený tvar a výpočetní síť po prvním optimalizačním kroku (Freeform Scale Factor = 3)

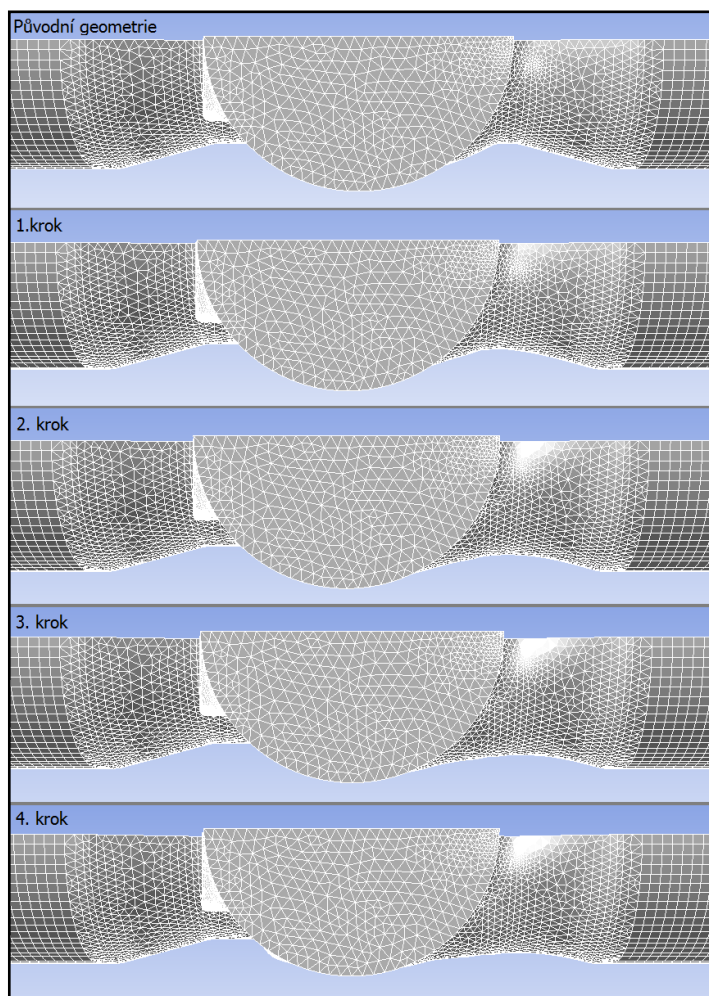


obr. 7.12 Průběh residuálů standardního výpočtu proudění po prvním optimalizačním kroku

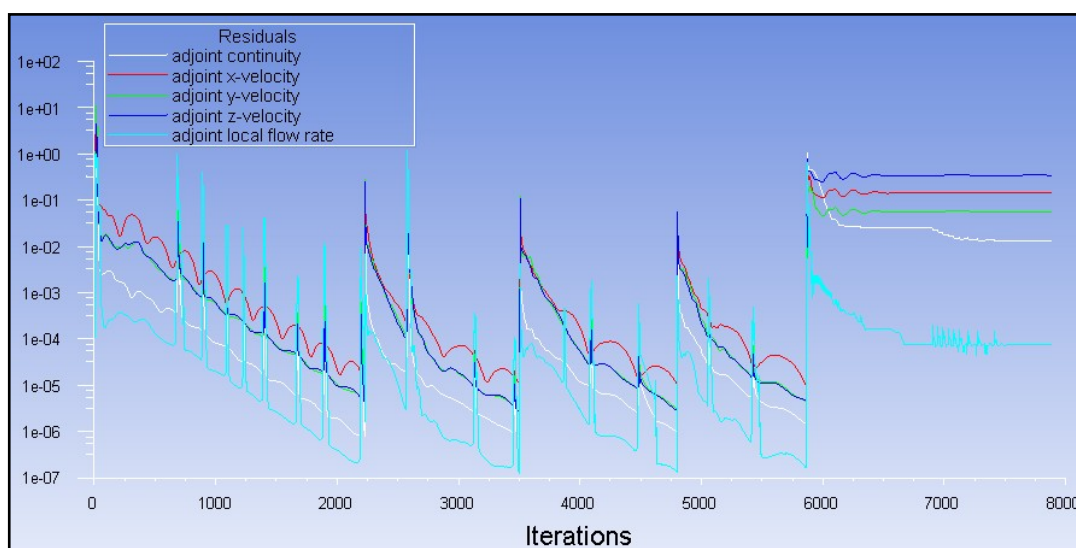
Po zkonvergování výpočtu byla vyhodnocena nová hodnota tlakového spádu. Následně se celý proces s adjungovaným výpočtem, úpravou geometrie a standardním výpočtem proudění opakuje do doby, kdy výpočty konvergují, nebo je hodnota sledované proměnné shledána vyhovující.

Optimalizace tvaru byla provedena pro tři alternativy nastavení hodnot "Freeform Scale Factor", které byly nastaveny na hodnoty 1, 2 a 3. Každá z těchto variant prošla čtyřmi optimalizačními kroky.

7.4.1 Freeform Scale Factor 1



obr. 7.13 Porovnání původního a upraveného tvaru po jednotlivých optimalizačních krocích (Freeform Scale Factor = 1)

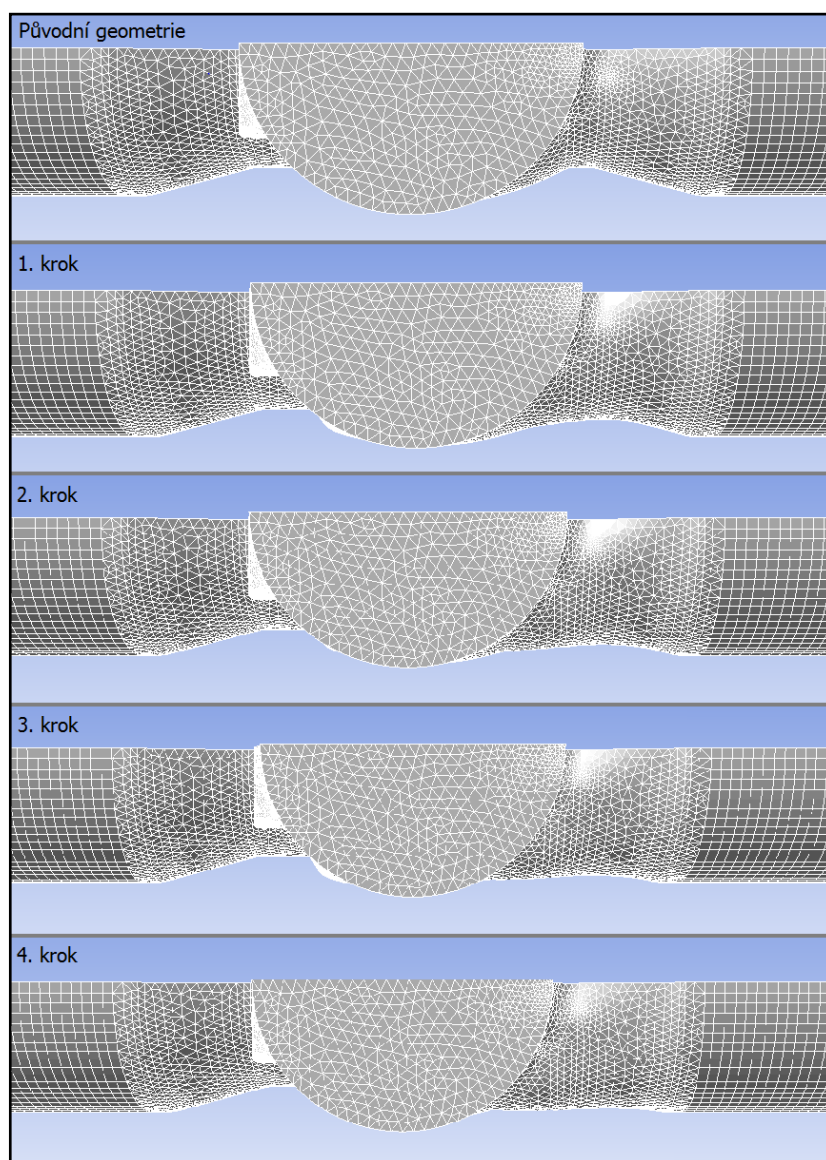


obr. 7.14 Průběh residuálů adjungovaného výpočtu po čtyřech optimalizačních krocích (Freeform Scale Factor = 1)

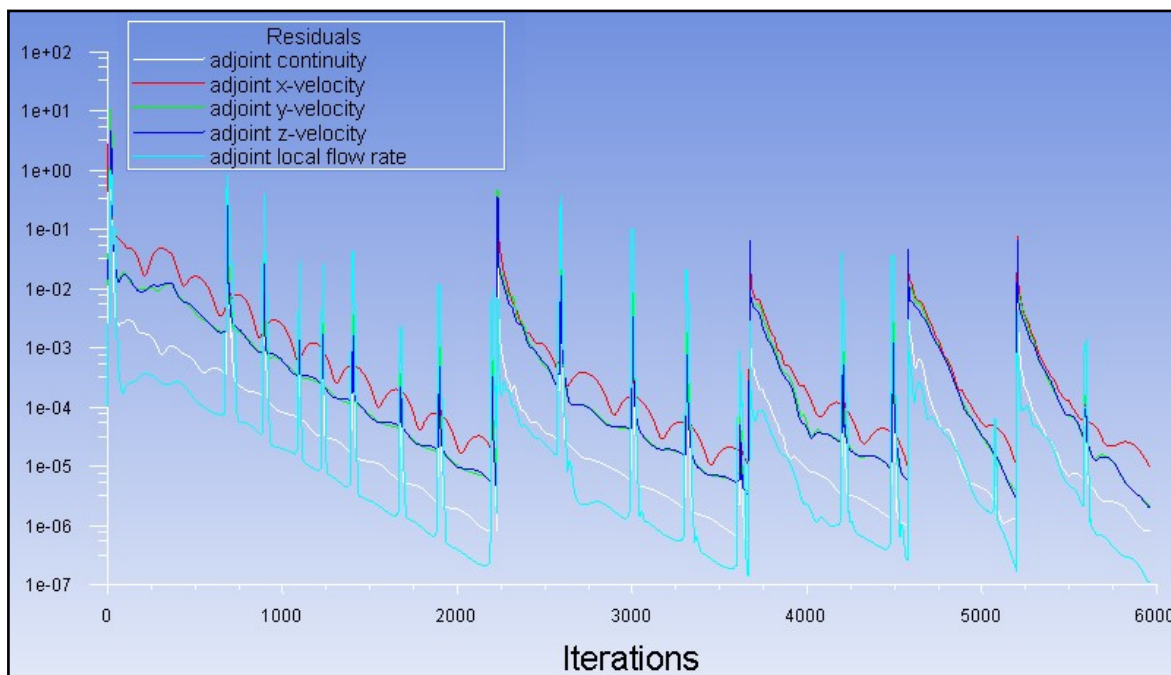
Na obr. 7.13 je viditelné, že Adjoint Solver má tendenci optimalizovat tvar narovnáváním výstupního difuzoru. Pro dané nastavení "Freeform Scale Factor" je změna tvaru v jednotlivých krocích plynulá, tedy nedochází k vytváření výrazně nepravidelných tvarů (výstupky apod.).

Z vyobrazení průběhu residuálů (obr. 7.14) lze usoudit, že by nebylo možné provést pátý optimalizační krok, protože po čtvrté úpravě geometrie již residuály adjungovaného výpočtu citlivosti neměly tendenci konvergovat. Kdyby tomu tak ovšem nebylo a pokračovalo se s optimalizací, tak lze předpokládat, že dojde k úplnému vyrovnání difuzoru.

7.4.2 Freeform Scale Factor 2



obr. 7.15 Porovnání původního a upraveného tvaru po jednotlivých optimalizačních krocích (Freeform Scale Factor = 2)

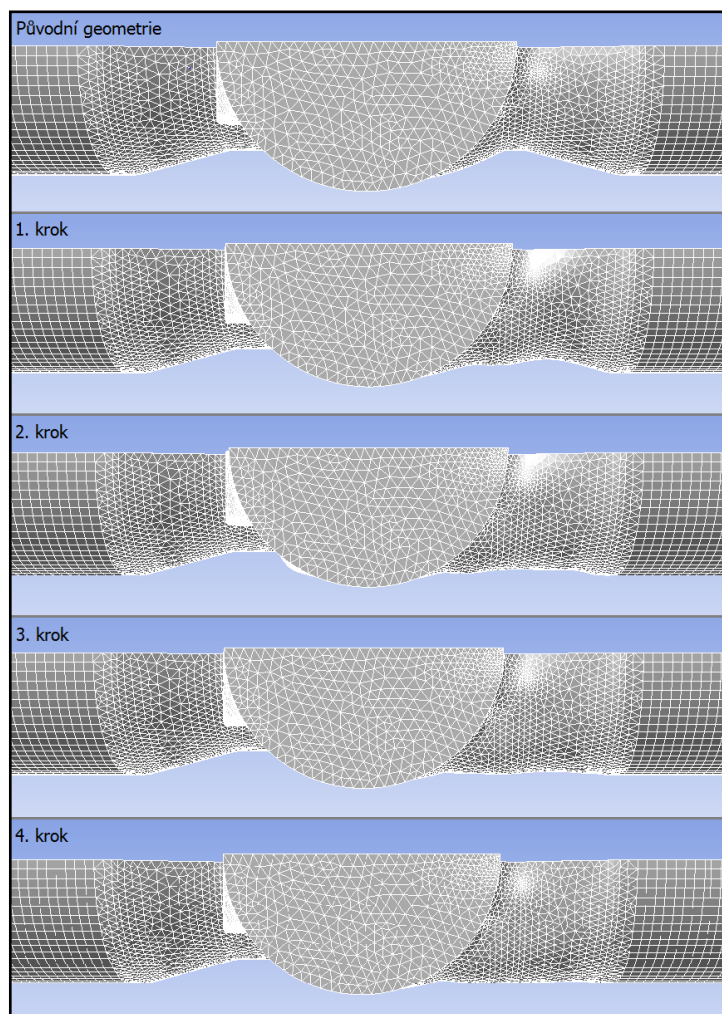


obr. 7.16 Průběh residuálů adjungovaného výpočtu po čtyřech optimalizačních krocích
(Freeform Scale Factor = 2)

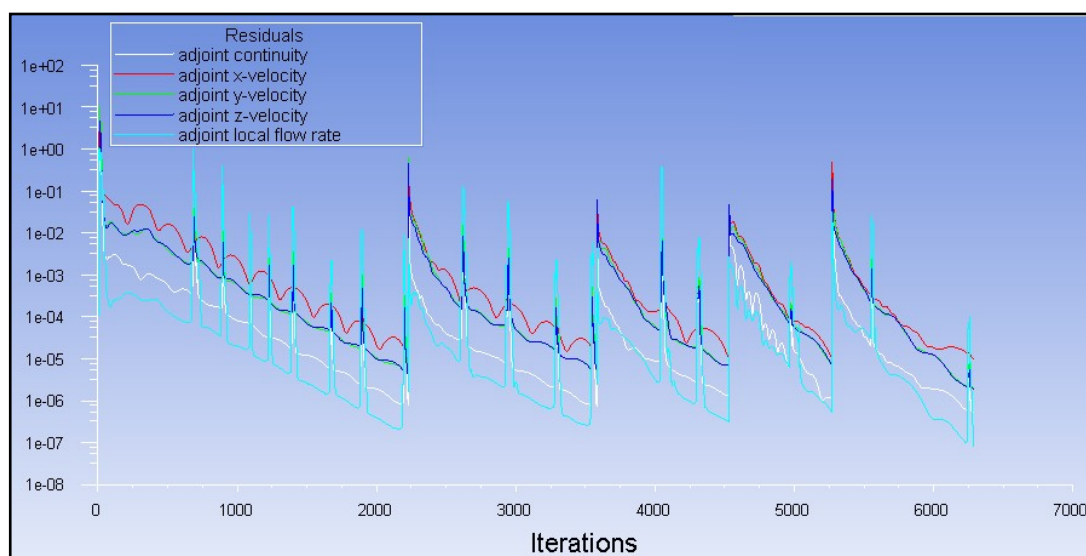
Při tomto nastavení "Freeform Scale Factor" jsou deformace výraznější, avšak stále ještě nedochází k tvorbě nepravidelností. Vlivem vyšší hodnoty "Freeform Scale Factor" dochází při čtvrtém optimalizačním kroku ke zřetelnějšímu narovnání difuzoru než v předchozím případě.

Průběh residuálů adjungovaného výpočtu je, v rámci této úlohy, bezproblémový a naznačuje možnost pokračování v optimalizaci.

7.4.3 Freeform Scale Factor 3



obr. 7.17 Porovnání původního a upraveného tvaru po jednotlivých optimalizačních krocích (Freeform Scale Factor = 3)



obr. 7.18 Průběh residuálů adjungovaného výpočtu po čtyřech optimalizačních krocích (Freeform Scale Factor = 3)

Zde dochází už při první deformaci k výrazné změně tvaru, která již není tak plynulá jako v předchozích případech. Část výstupního difuzoru je zdeformována více, než zbylá část, což vede ke vzniku nepravidelnosti. V následujících krocích se však tvar vyrovná. Stále je to však viditelná odlišnost od předchozích úprav, které neměly takovou skokovou změnu.

Stejně jako v předchozím případě je průběh residuálů adjungovaného výpočtu uspokojivý a umožňuje v případě potřeby pokračovat v optimalizaci.

Průběhy residuálů standardních výpočtů po čtvrtých optimalizačních krocích jsou zaznamenány v příloze C a další grafické srovnání deformací lze nalézt v příloze D.

Dalším postupem by bylo exportování upravených geometrií a jejich opětovné otevření v programu "Design Modeler". Do každé z těchto geometrií by se navrátil talíř klapky a provedl se nový standardní výpočet proudění. Určily by se hodnoty ztrátového součinitele a následně by došlo k jejich porovnání s původní geometrií. Tento postup se však projevil jako velmi obtížný a v rámci této práce se jej nepodařilo uskutečnit. Hlavním problémem je, že Adjoint Solver neobsahuje nástroj pro exportování upravené geometrie.

Byl proveden pokus o převedení geometrie, kdy základní soubor ve formátu *.cas byl nahrán do programu "Fluent (with Fluent Meshing)", který umožnil uložení do formátu *.stl. Tento formát převádí 3D geometrii do geometrie složené ze sítě (převážně trojúhelníkové elementy). Následně se tento soubor otevřel v programu Solidworks a provedl se pokus o převedení sítě na klasický solid model a jeho uložení ve formátu, jenž "Design Modeler" podporuje (např *.step nebo *.iges). Tento postup však nefungoval, neboť počet elementů sítě byl příliš vysoký a přesahoval možnosti programu. Programy, které by umožnily tento postup, nejsou ve škole k dispozici a jejich pořízení by bylo finančně náročné.

7.4.4 Vyhodnocení tlakových spádů

Přistoupilo se tedy k vyhodnocení tlakových spádů. K vyhodnocení by použita nabídka "Observables" a v ní obsažena funkce "Evaluate". V tab. 7.1 jsou vypsány hodnoty pro jednotlivé optimalizační kroky a dané nastavení "Freeform Scale Factor". Vždy je uvedena předpokládaná hodnota tlakového spádu a skutečná hodnota po úpravě geometrie.

			Freeform Scale Factor				
			1	2	3		
Bez talíře klapky		Δp	Skutečnost	9480,21		[Pa]	
Optimalizační krok	1		Předpoklad	7021,80	4563,39		2104,98
			Skutečnost	8474,50	8064,03		8035,44
	2		Předpoklad	7108,71	6408,71		6888,38
			Skutečnost	8040,94	7696,43		7727,05
	3		Předpoklad	7636,77	6657,52		6541,76
			Skutečnost	7981,43	7662,55		7641,89
	4		Předpoklad	7714,04	6971,08		6904,16
			Skutečnost	7783,59	7694,68		7591,60
S talířem	Otevřený		Skutečnost	11197,34			
	Pootevřený	Skutečnost	61809,98				

tab. 7.1 Vyhodnocené tlakových spádů

V tab. 7.2 jsou vyhodnoceny předpokládané a skutečné hodnoty, o které se sníží tlakový spád. Předpokládané hodnoty jsou udány v nabídce "Design Tool", při použití funkce "Calculate Design Change".

				Freeform Scale Factor			
				1	2	3	
Optimalizační krok	1	Δp	Předpoklad	2458,41	4916,82	7375,229	[Pa]
			Skutečnost	1005,711	1416,184	1444,771	
	2		Předpoklad	1365,791	1655,319	1147,064	
			Skutečnost	433,5586	367,593	308,392	
	3		Předpoklad	404,1727	1038,915	1185,285	
			Skutečnost	59,5144	33,8881	85,157	
	4		Předpoklad	267,3881	691,4705	737,7318	
			Skutečnost	197,833	-32,1311	50,293	

tab. 7.2 Předpokládané a skutečné změny tlakového spádu

Z vyhodnocených hodnot je viditelné, že předpokládané hodnoty změny tlakového spádu jsou dosti nadsazené. Nelze se tedy podle nich přesně orientovat. Nejvýraznějšího poklesu je vždy dosaženo při prvním optimalizačním kroku, přičemž s každým následujícím krokem dochází ke snížení velikosti změny tlakového spádu.

V případě čtvrtého optimalizačního kroku pro nastavení "Freeform Scale Factor" na hodnotu 2, dochází ke zvýšení tlakového spádu. Důvodem může být, že část geometrie se deformovala v nějakém místě nevhodně např. deformace na hranici.

8 Vyhodnocení ztrátového součinitele

Ztrátový součinitel je vyhodnocen dle rovnice 8.1. Hodnoty totálního tlaku na vstupu a výstupu a dynamického tlaku na výstupu lze zjistit v nabídce "Reports/Result Reports/Surface Integrals".

$$\zeta = \frac{p_{TOTvstup} - p_{TOTvýstup}}{p_{DYNvýstup}} \quad (8.1)$$

Ztrátový součinitel byl vyhodnocen pro varianty geometrie s talířem klapky, bez talíře klapky a pro čtvrté optimalizační kroky jednotlivých nastavení "Freeform Scale Factor" (tab. 8.1).

	S talířem klapky		Bez talíře klapky	Freeform Scale Factor			
	Otevřený	Pootevřený		1	2	3	
PTOT vstup	23743,30	74362,34	22107,66	20385,33	20294,49	20186,21	[Pa]
PTOT výstup	12547,33	12554,79	12628,49	12603,00	12601,49	12595,92	
pDYN výstup	12546,29	12552,56	12628,16	12602,60	12600,45	12595,52	
ζ	0,8924	4,9239	0,7506	0,6175	0,6105	0,6026	[1]

tab. 8.1 Vyhodnocení ztrátových součinitelů

V tab. 8.2 je zaznamenán procentuální rozdíl ztrátových součinitelů mezi geometrií bez talíře klapky a optimalizovanými geometriemi (čtvrté optimalizační kroky) pro jednotlivé nastavení "Freeform Scale Factor".

	Bez talíře klapky	Freeform Scale Factor			
		1	2	3	
ζ	0,7506	0,6175	0,6105	0,6026	[1]
Rozdíl	-	17,73	18,66	19,72	[%]

tab. 8.2 Procentuální rozdíl ztrátových součinitelů

9 Řešení působení hydrodynamické síly

V programu Fluent je složka celkové síly F_a působící na stěnu podél předepsaného vektoru a počítána sečtením skalárních součinů tlakových $d\vec{F}_p$ a viskózních sil $d\vec{F}_v$ s předepsaným vektorem síly a na každé ploše buňky sítě pokrývající plochu. Členy u tohoto součtu představují tlakové a viskózní složky síly ve směru vektoru síly a .

Tlakovou sílu lze vyjádřit následovně:

$$\begin{aligned}d\vec{F}_p &= -p\vec{n}dS \\ \vec{F}_p &= \iint_S d\vec{F}_p = - \iint_S p\vec{n}dS\end{aligned}\tag{9.1}$$

Vyjádření viskózní síly je zapsáno níže:

$$\begin{aligned}d\vec{F}_v &= \tau\vec{n}dS \\ \vec{F}_v &= \iint_S d\vec{F}_v = \iint_S \tau\vec{n}dS\end{aligned}\tag{9.2}$$

Složka celkové síly:

$$\begin{aligned}dF_a &= \vec{a} \cdot d\vec{F}_p + \vec{a} \cdot d\vec{F}_v \\ F_a &= \vec{a} \cdot \iint_S d\vec{F}_p + \vec{a} \cdot \iint_S d\vec{F}_v \\ F_a &= \vec{a} \cdot \vec{F}_p + \vec{a} \cdot \vec{F}_v\end{aligned}\tag{9.3}$$

9.1 Vyhodnocení hydrodynamické síly působící na talíř klapky

Pro vyhodnocení hydrodynamické síly působící na talíř klapky bylo nejprve nutné určit hodnoty tlakové a viskózní síly v jednotlivých osách. Tyto hodnoty byly určeny pomocí nabídky "Reports/Result Reports/Forces", kde se určila osa a stěna, v tomto případě talíř klapky, na kterou má síla působit.

Voda	Talíř klapky					
	Otevřený			Pootevřený		
	Síla					
	[N]					
Osa	Tlaková	Viskózní	Celková	Tlaková	Viskózní	Celková
x	-1735,29	3,47	-1731,82	-20317,13	-23,29	-20340,42
y	1447,37	0,28	1447,65	26148,77	-40,27	26108,50
z	-1577,57	3,97	-1573,59	-12488,78	-40,23	-12529,01

tab. 9.1 Vyhodnocení sil působících na talíř klapky

Protože je geometrie řešena v podélném řezu pomocí podmínky symetrie, mají vyhodnocené hodnoty poloviční velikost a síla v ose z, je počítána jako nulová.

Výsledná síla se určila dle:

$$F_C = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (9.4)$$

Síla		Talíř klapky	
		Otevřený	Pootevřený
F_C	[N]	2257,19	33096,62

tab. 9.2 Vyhodnocení celkové síly působící na talíř klapky

Dle očekávání je síla působící na talíř klapky v pootevřeném stavu výrazně větší než v případě plně otevřeného talíře z důvodu většího zásahu do průtočného průřezu.

10 Standardní výpočet proudění páry

Protože pára nevyhovuje kritériím adjungovaného řešitele, nemohla být použita jako proudící médium a rovněž dle podkladů poskytnutých společností Armatury Group a.s. je ztrátový součinitel zpětné klapky určován pro proudění vody. Pro názornost je však proveden standardní výpočet proudění páry a je vyhodnocen ztrátový součinitel a síla působící na talíř klapky.

Výpočty byly provedeny pro verze s talířem klapky, bez talíře klapky a pro čtvrté optimalizační kroky jednotlivých nastavení "Freeform Scale Factor". Geometrie, výpočetní síť a nastavení metod výpočtu zůstaly shodné s verzemi, kde proudila voda. Byly však upraveny parametry proudícího média a nastavení okrajových podmínek.

Proudění páry bylo nastaveno pro následující parametry:

Q_m	6,4	kg·s ⁻¹
p_{abs}	850000	Pa
t	355	°C

tab. 10.1 Parametry proudící páry

Fyzikální vlastnosti páry jsou definovány dle kinetické teorie, viz kapitola 5. Při výpočtu se neuvažovala změna teploty, protože není známo, v jakém prostředí se zpětná klapka nachází a zdali je izolovaná. Při definování okrajových podmínek se tedy nastavila konstantní teplota 355°C (628 K). Vstupní okrajová podmínka byla změněna na "Mass Flow Inlet" (hmotnostní průtok).

V tabulkách níže jsou vyhodnoceny síly působící na talíř.

Pára	Talíř klapky					
	Otevřený			Pootevřený		
	Síla					
	[N]					
Osa	Tlaková	Viskózní	Celková	Tlaková	Viskózní	Celková
x	-2,99	0,01	-2,98	-35,49	-0,05	-35,53
y	2,51	0,00	2,51	45,07	-0,09	44,98
z	-2,41	0,01	-2,40	-22,35	-0,10	-22,45

tab. 10.2 Vyhodnocení sil působících na talíř klapky (pára)

Síla		Talíř klapky	
		Otevřený	Pootevřený
F_C	[N]	3,89	57,32

tab. 10.3 Vyhodnocení celkové síly působící na talíř klapky (pára)

Ztrátový součinitel je vyhodnocen i pro optimalizované geometrie (tab. 10.4 a tab. 10.5). Jakmile byl proveden čtvrtý optimalizační krok, bylo předdefinováno proudící médium z vody na páru, a byl proveden standardní výpočet proudění.

	S talířem klapky		Bez talíře klapky	Freeform Scale Factor			
	Otevřený	Pootevřený		Freeform Scale Factor			
				1	2	3	
p TOTvstup	45,01	122,46	38,34	35,45	34,75	36,14	[Pa]
p TOTvýstup	22,13	22,03	22,16	22,27	22,32	22,26	
p DYNvýstup	22,12	22,03	22,16	22,27	22,31	22,06	
ζ	1,0344	4,5588	0,7302	0,5919	0,5573	0,6291	[1]

tab. 10.4 Vyhodnocení ztrátových součinitelů (pára)

	Bez talíře klapky	Freeform Scale Factor			
		1	2	3	
ζ	0,7302	0,5919	0,5573	0,6291	[1]
Rozdíl	-	18,95	23,69	13,84	[%]

tab. 10.5 Procentuální rozdíl ztrátových součinitelů (pára)

Proudění páry je pro plyny velmi pomalé a tlakové síly ve srovnání s vodou jsou o řády nižší, téměř na hranici přesnosti. Z časových důvodů se neprovedlo bližší zkoumání. Ideálně by bylo potřeba otestovat proudění na jednodušších proměřených úsecích obvodu a posléze přikročit k výpočtu s klapkou. Udané hodnoty sil a ztrátových součinitelů jsou tedy jen orientační.

11 Závěr

Teoretická část práce byla nejdříve věnována zpětným klapkám a definici matematického modelu založeného na proudění jednofázové tekutiny. Především se však zaměřilo na teorii optimalizace s využitím gradientové metody, která byla středobodem této práce. Byl vysvětlen princip fungování adjungovaného řešitele, metodologie a kritéria použití atd.

V praktické části byl nejdříve popsán postup tvorby geometrie a sítě, s následným definováním matematického modelu určeného pro standardní výpočet proudění ve zpětné klapce. Protože tento výpočet neměl tendenci konvergovat, přistoupilo se k zjednodušení metod řešení. Znat naprosto přesně proudění v klapce nebylo pro tuto úlohu klíčové. Důležité bylo získat soubor dat popisující proudění.

Dále se přikročilo k aplikaci Adjoint Solveru. Vlivem zpětného proudění a víření v klapce však nebylo možné provést adjungovaný výpočet a optimalizovat geometrii. Řešením se ukázalo odstranění talíře klapky (jehož geometrie je považována za neměnnou a do optimalizace nevstupuje) a výrazné snížení počtu buněk výpočetní sítě. Jednalo se o naprosto nutný ústupek, bez něhož by nebylo možné úlohu dále řešit.

Byl tedy proveden adjungovaný výpočet pro upravenou geometrii a vyhodnotilo se citlivostní pole. Nastavily se parametry upravení geometrie a provedla se optimalizace tvaru. Ta byla provedena pro tři alternativy nastavení hodnot "Freeform Scale Factor", které byly nastaveny na hodnoty 1, 2 a 3. Každá z těchto variant prošla čtyřmi optimalizačními kroky. Platí, že čím větší hodnota "Freeform Scale Factor", tím větší deformace, vznik nepravidelností a menší plynulost změny tvaru. V rámci názornosti byly hodnoty "Freeform Scale Factor" neměnné, avšak je možné je mezi jednotlivými kroky měnit a dosáhnout plynulé změny tvaru.

Následně byly vyhodnoceny tlakové spády, ztrátové součinitele a hydrodynamické síly působící na talíř klapky. Byly porovnány ztrátové součinitele pro čtvrté optimalizační kroky jednotlivých variant nastavení "Freeform Scale Factor" s geometrií bez talíře klapky. Pro vodu se dosáhlo snížení ztrátového součinitele až o 19,7%, pro páru 26%.

Adjoint Solver je stále ještě nový nástroj, který vyžaduje další vývoj. Jeho omezení v kombinaci s chybějící funkcí na exportování optimalizované geometrie jej činí poněkud uživatelsky nepřívětivým. Protože není schopen pracovat se zpětným a vířivým prouděním,

je vhodný pouze pro jednoduché geometrie. Přes všechny nevýhody se ale jedná o silný inženýrský nástroj pro navrhování optimalizace tvaru.

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce prof. RNDr. Miladě Kozubkové, CSc. za její trpělivost, ochotu a čas, který mi věnovala v průběhu vypracovávání diplomové práce.

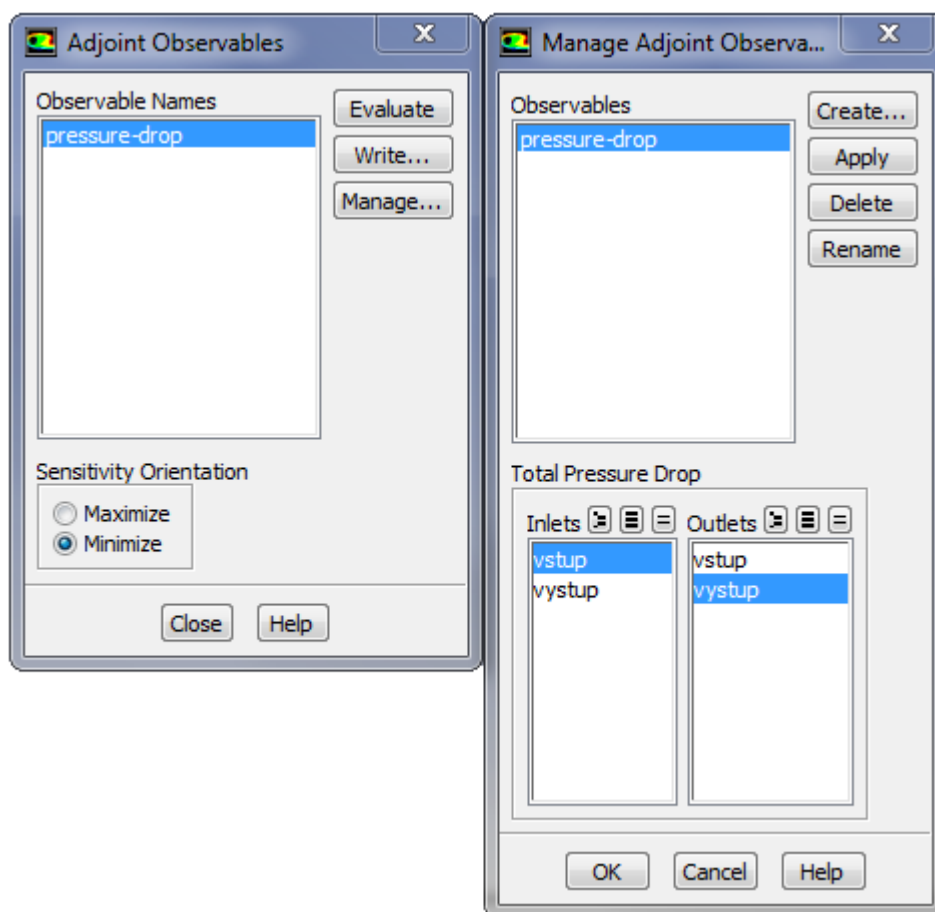
12 Použitá literatura

- [1] KOZUBKOVÁ, Milada. *Simulace a modelování hydraulických systémů* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Kozubkova-Simulace2009.pdf>
- [2] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin: FLUENT, CFX* [online]. 1. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 153 s. [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Kozubkova-Fluent.pdf>
- [3] MIKULA, Julius a kol.. *Potrubí a armatury*. Praha: STNL - Nakladatelství technické literatury, 1969, 440 s. [cit. 2017-05-07]
- [4] ARMATURY GROUP. *Zpětné armatury* [online]. 2015 [cit. 2017-05-07]. Dostupné z: http://www.armaturygroup.cz/soubory/Produktove%20katalogy%20CZ%20EN/klapky-zpetne_dle-en_cz_final_mensi.pdf
- [5] MARŠÍK, František. *Numerické metody mechaniky kontinua*. Praha, 1990 [cit. 2017-05-07]. ÚT AV ČR. Dostupné z: http://www.it.cas.cz/files/u1771/Num_metody_mech_kontinua.pdf
- [6] ANSYS FLUENT Manual. ANSYS FLUENT Adjoint Solver. Version 15.0. ANSYS, Inc., 2013. 86 s. [cit. 2017-05-07]
- [7] TZANAKIS, Athanasios. *Duct optimization using CFD software 'ANSYS Fluent Adjoint Solver'*. Göteborg, Švédsko, 2014. Diplomová práce. Chalmers University of Technology in Göteborg. 42 s. [cit. 2017-05-07] Dostupné z: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/202020/202020.pdf>
- [8] ANSYS FLUENT Manual. ANSYS FLUENT Advanced Add-On Modules Version 16.2. ANSYS, Inc., 2015. 474 s. [cit. 2017-05-07]
- [9] JABLONSKÁ, Jana a Milada KOZUBKOVÁ. *Diagnostics of resistance coefficients and cavitation of flow control valve* [online]. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, [cit. 2017-05-07].
- [10] KOZUBKOVÁ, Milada a kol. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti* [online]. VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2011, 173 s. [cit. 2017-05-07]. ISBN 978-80-248-2491-8. Dostupné z: http://www.338.vsb.cz/wp-content/uploads/2016/03/Kozubkova-Modelovani_prenosu_tepla_hmoty_a_hybnosti-KOZUBKOVA.pdf

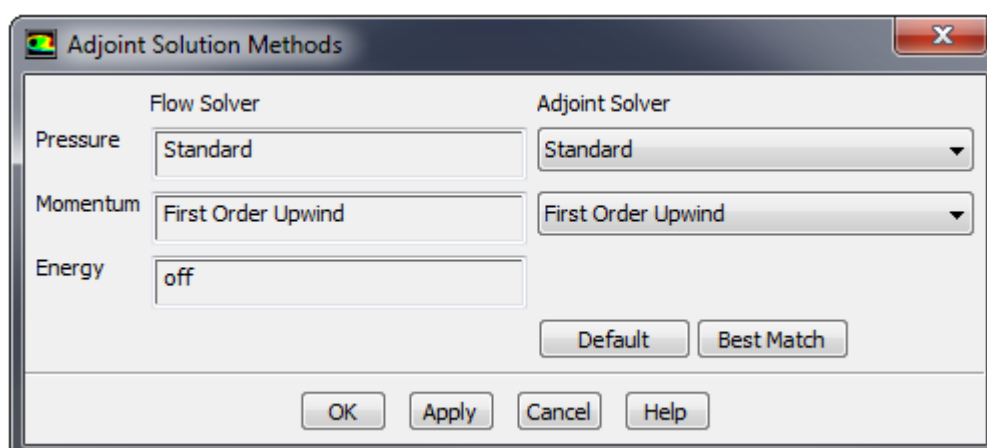
[11] KUKELKA, Jiří. *Numerické modelování obtékání klapky: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2013, 69 s. [cit. 2017-05-07] Vedoucí práce: doc. Ing. Sylva Drábková, Ph.D.

13 Seznam příloh

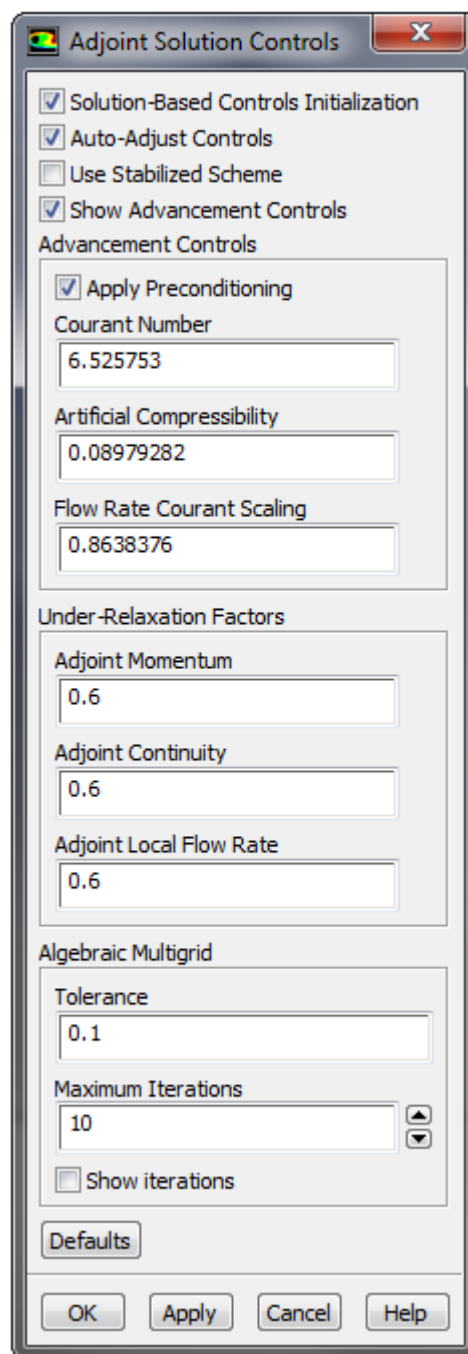
Příloha A. Nastavení adjungovaného výpočtu



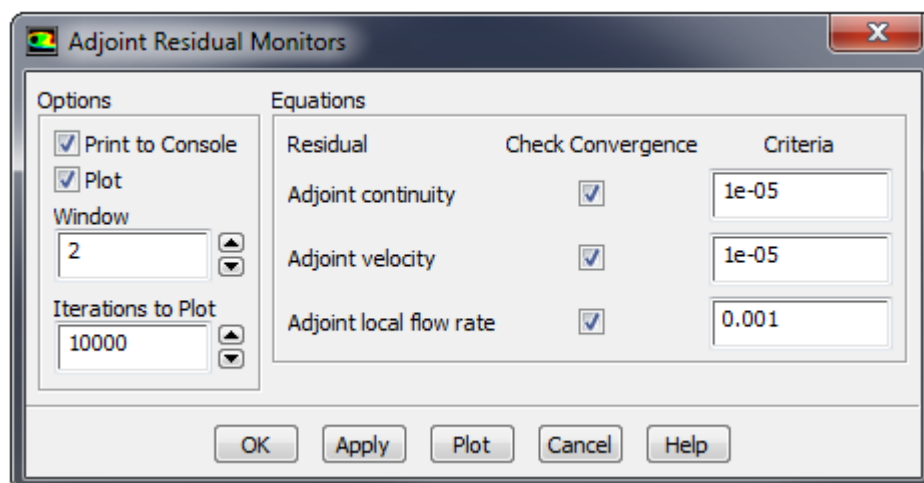
obr. 13.1 Zobrazení nastavení sledované proměnné v podnabídce "Observables"



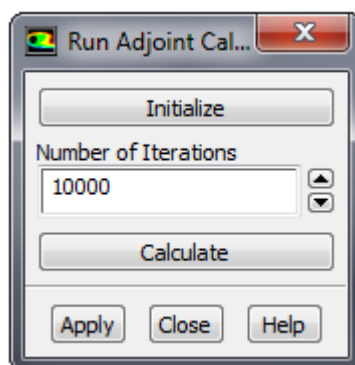
obr. 13.2 Zobrazení nastavení metod řešení v podnabídce "Adjoint Solution Methods"



obr. 13.3 Zobrazení rozšířených nastavení řešení v podnabídce "Adjoint Solution Controls"

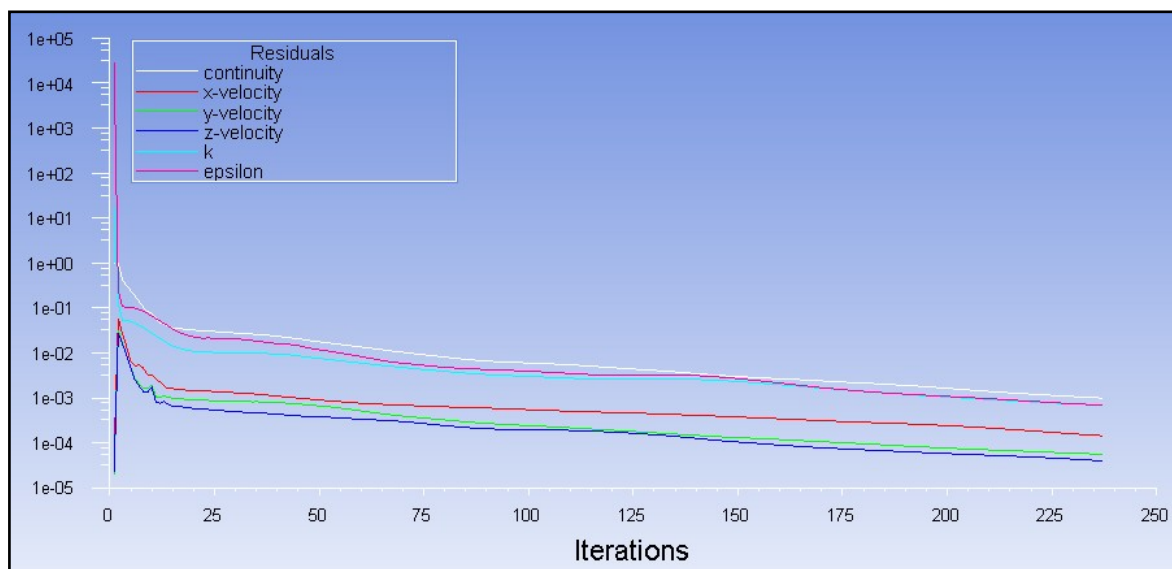


obr. 13.4 Zobrazení nastavení kontroly residuálů v podnabídce "Adjoint Residual Monitors"



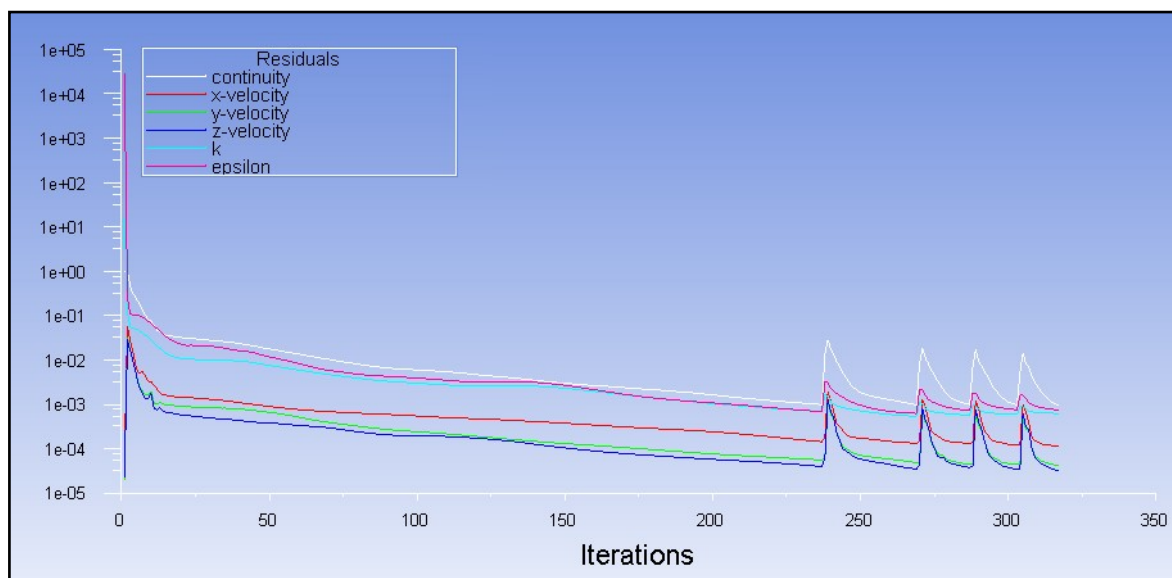
obr. 13.5 Zobrazení nastavení v podnabídce "Run Adjoint Calculation"

Příloha B. Průběh residuálů standardního výpočtu - geometrie bez talíře klapky

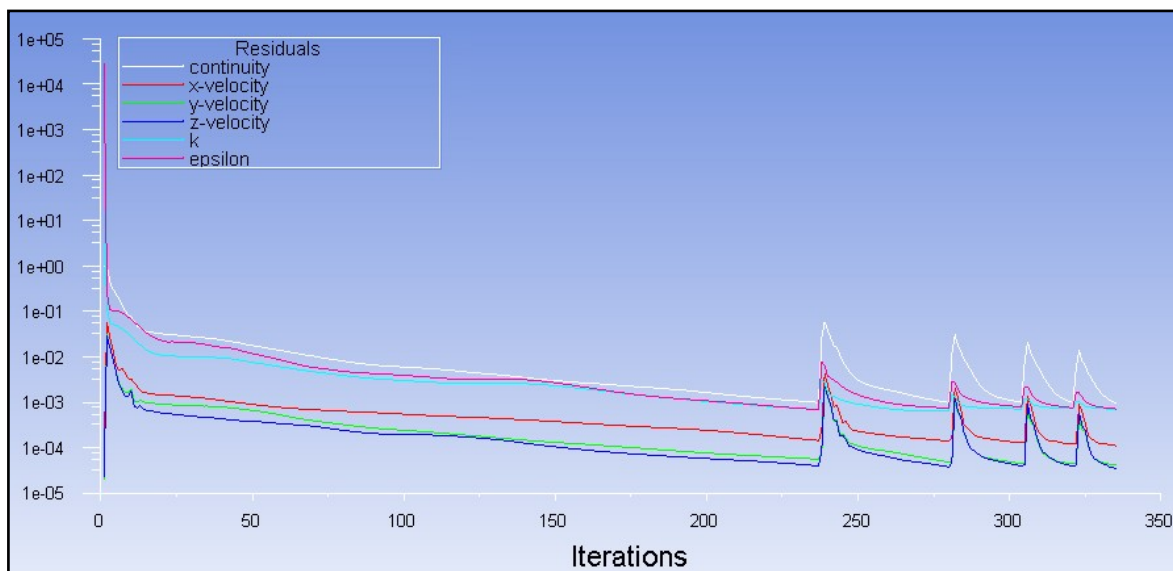


obr. 13.6 Průběh residuálů standardního výpočtu - geometrie bez talíře klapky

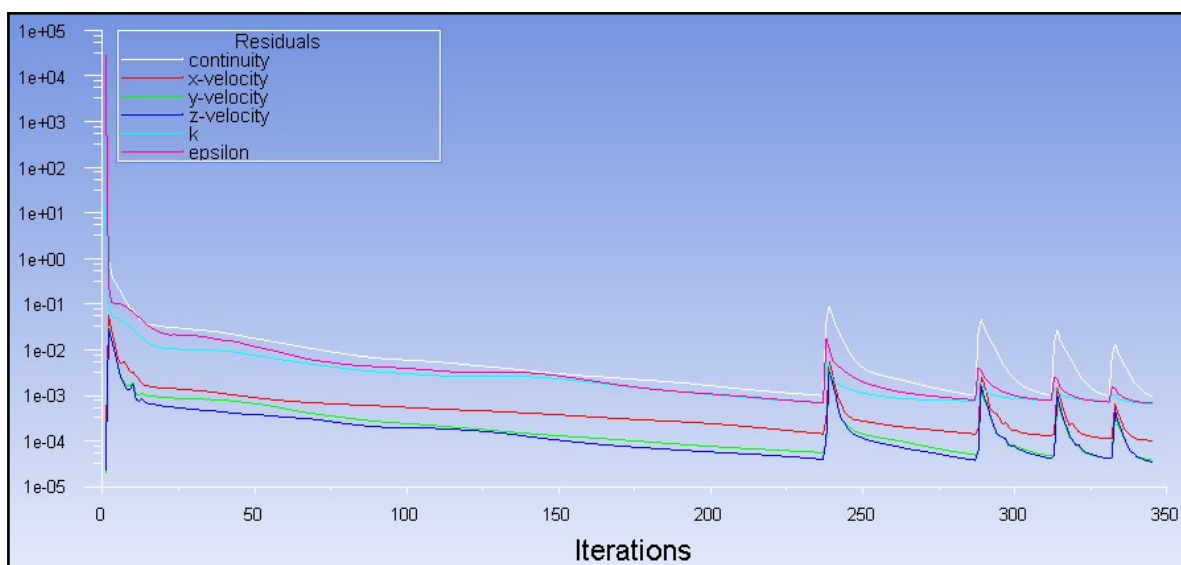
Příloha C. Zobrazení průběhů residuálů standardních výpočtů po čtvrtých optimalizačních krocích pro jednotlivá nastavení hodnot "Freeform Scale Factor"



obr. 13.7 Průběh residuálů standardního výpočtu proudění po čtyřech optimalizačních krocích ("Freeform Scale Factor" = 1)

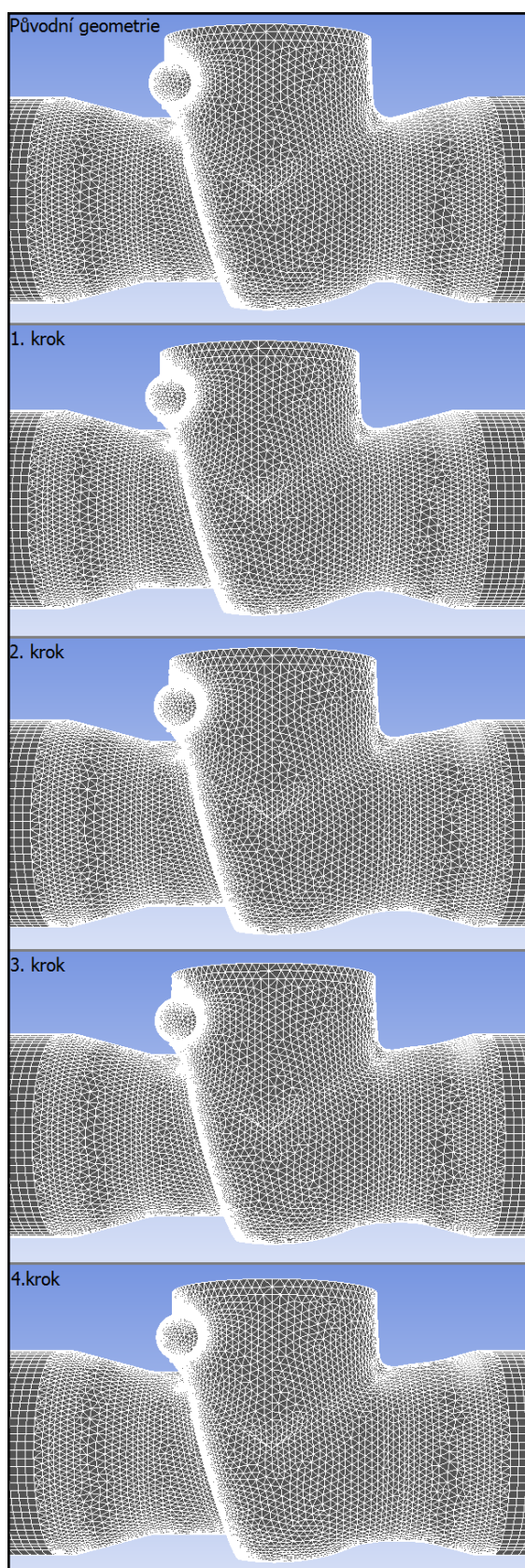


obr. 13.8 Průběh residuálů standardního výpočtu proudění po čtyřech optimalizačních krocích ("Freeform Scale Factor" = 2)

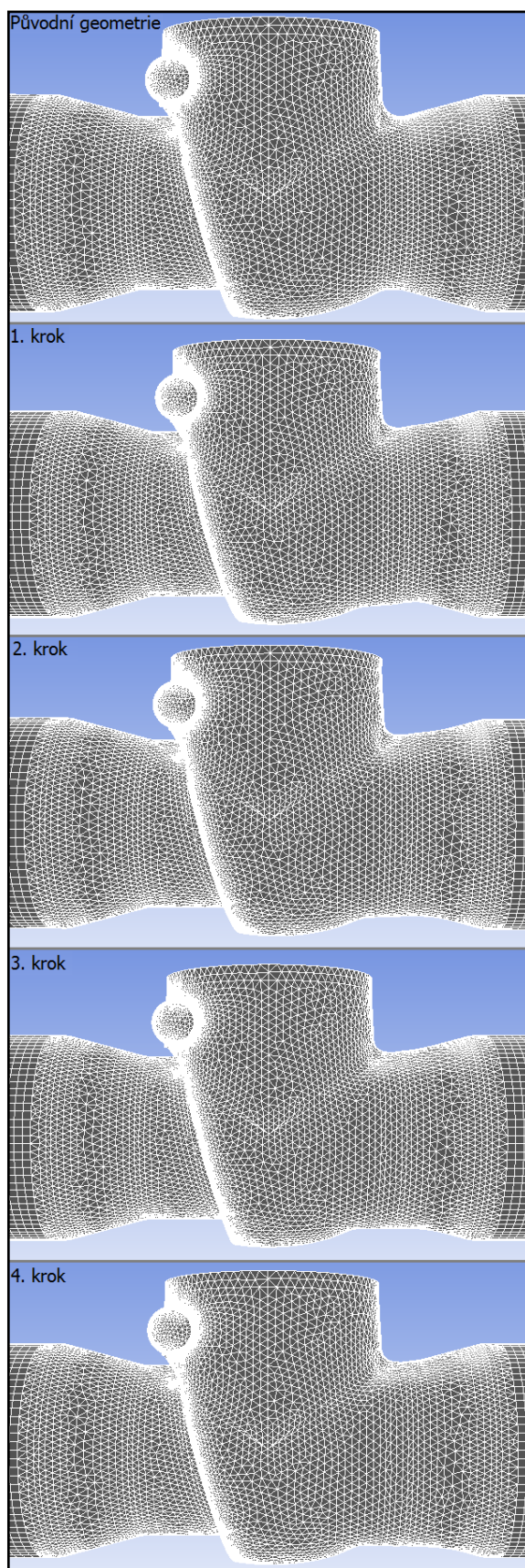


obr. 13.9 Průběh residuálů standardního výpočtu proudění po čtyřech optimalizačních krocích ("Freeform Scale Factor" = 3)

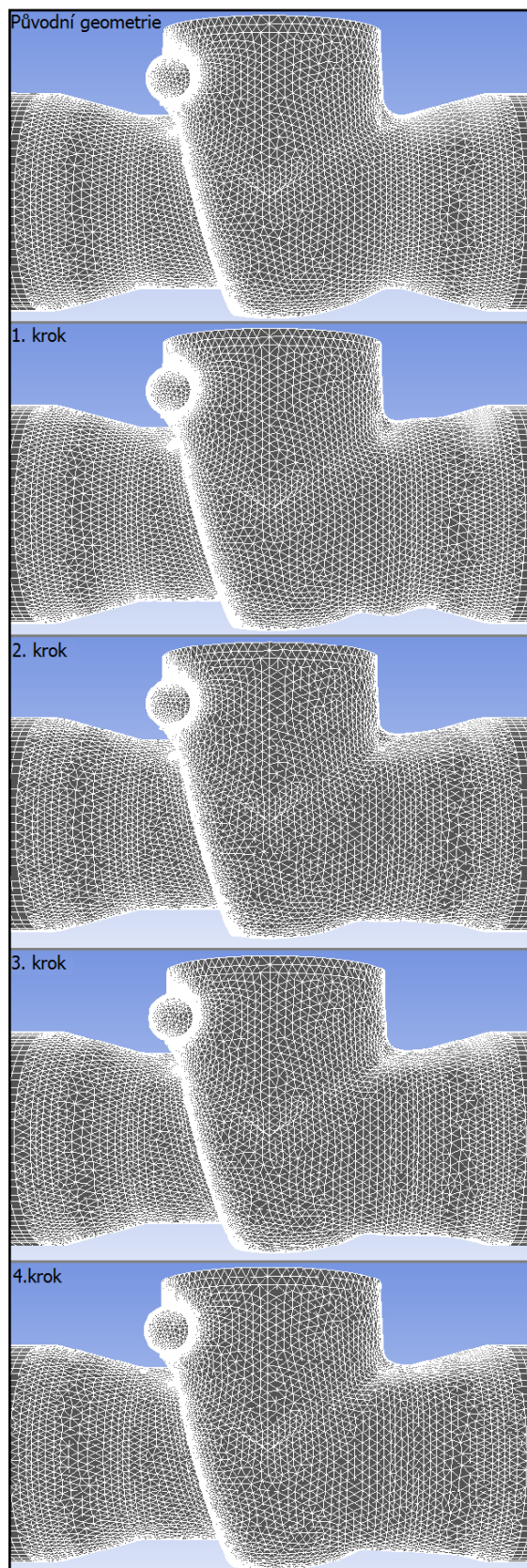
Příloha D. Porovnání původního a upraveného tvaru po jednotlivých optimalizačních krocích a nastaveních "Freeform Scale Factor"



obr. 13.10 Porovnání původního a upraveného tvaru po jednotlivých optimalizačních krocích (Freeform Scale Factor = 1)



obr. 13.11 Porovnání původního a upraveného tvaru po jednotlivých optimalizačních krocích (Freeform Scale Factor = 2)



obr. 13.12 Porovnání původního a upraveného tvaru po jednotlivých optimalizačních krocích (Freeform Scale Factor = 3)